

平成18年度～平成20年度私立大学学術研究高度化推進事業
「オープン・リサーチ・センター整備事業」研究成果報告書

経済実験による研究と教育： 実験から誰が何を学ぶか

平成21年3月



第1部 プロジェクトの概要	.....1
1. 平成18年度~平成20年度私立大学学術研究高度化推進事業オープン・リサーチ・センター整備事業『経済実験による研究と教育：実験から誰が何を学ぶか』の活動と研究の概要 小田宗兵衛	.....5
第2部 プロジェクトメンバーの主要論文	.....99
2. 神経経済学は経済学に貢献するか？—時間選好のfMRI実験を例に 小田宗兵衛 『システム/制御/情報』(2009), Vol.53, pp. 133-139	..... 99
3. Group Size Effects on Cartel Formation and the Enforcement Power of Leniency Programs Yasuyo Hamaguchi, Aiko Shibata and Toshiji Kawagoe “International Journal of Industrial Organization” (2009), Vol.27, pp.145-167	.....105
4. Construction of Reversible Lattice Molecular Automata Takayuki Nozawa and Toshiyuki Kondo “Mathematical Logic Quarterly” (2009), (to appear)	.....127
5. 連続体上の計算概念について - 再帰関数を超えるもの - 八杉満利子 『哲学論叢』京都大学哲学論叢刊行会編 (2008), Vol. XXXV, pp.199-209	.....156
6. Prisoner's Dilemma Network: Experiments and Simulations Kouhei Iyori “System Sciences for Economics and Informatics” (2007), pp.35-49	.....168
7. How to Use Private Information in a Multi-person Zero-sum Game Hiroyasu Yoneda, Gen Nasumoto and Sobei H. Oda “Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems” Springer-Verlag (2007), Vol.590 pp.239-244	.....183
8. An Experimental Analysis of Environmentally Conscious Decision-making for Sustainable Consumption Nariaki Nishino, Yasuyuki Okawa, Sobei H. Oda and Kanji Ueda “Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses” Springer-Verlag (2007), Vol.590 pp.407-412	.....189

9. エラー付き指導者ゲームにおける戦略の進化 秋山英三, 吉田和男 “The Proceedings of JAWS 2008” (2008) , Vol.590 pp.1-8	195
10. Contributing for Myself, but Free-Riding for My Group? Yoshio Iida and Christiane Schwieren “Proceeding of The 11th Experimental Social Sciences Conference” (2007)	210
11. 自生的なグループ形成とエージェント間の協調行動 小林 洋平・舛本 現・川村 哲也 『第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集』(2007)	234
12. False-Name-Proof Mechanisms for Hiring a Team Atsushi Iwasaki, David Kempe, Yasumasa Saito, Mahyar Salek and Makoto Yokoo 3rd International Workshop On Internet And Network Economics (2007)	236
13. 多市場接触環境において相互協力を達成する戦略について 小川 一仁・川村 哲也・菊谷 達弥・小田 宗兵衛 第11回進化経済学会 (2007)	250
第3部 経済実験と経済学教育	253
14. 競争市場実験 1	259
15. 競争市場実験 2	267
16. 競争市場実験 3	275
17. 複占市場実験 1	285
18. 複占市場実験 2	291
19. 複占市場実験 3	295
20. 複占市場実験 4	301

本報告書について

京都産業大学大学院経済学研究科は、2006年度から2008年度まで「私立大学学術研究高度化推進事業（オープン・リサーチ・センター整備事業）」として、『経済実験による研究と教育：実験から誰が何を学ぶか』を実施した。本報告書は、この活動と成果のまとめである。

本報告書は3部からなる。

第1部は、プロジェクト・リーダーによる本事業の活動と研究成果の概要である。本事業の目的・計画・活動・成果が概説されており、付録として活動記録と研究成果の一覧が付されている。お読みいただければ、脳活動計測実験を含めて様々な実験（実験日数は100日を超え、のべ参加者は2000人を超える）を実施した本事業の概略を知ることができるであろう。

第2部は、『経済実験による研究』の成果として、プロジェクト・メンバーの論文14編を収める。これらの論文は、プロジェクト・メンバーが単独または共同でした研究で、プロジェクト期間中に発表または掲載または掲載予定となったものである。本事業で整備された経済実験室で実施された経済実験に基づく研究成果が主体であるが、理論研究や計算機実験の成果も含まれている。これは本事業と最近の実験経済学研究の多様性を反映するものであり、読者の興味に応じてお読みいただきたい。興味をもたれた読者は該当する論文の著者に連絡されれば、関連する研究やその後の研究成果などを知ることができるであろう。

第3部は、『経済実験による教育』の成果として、教育用実験7つの資料と解説を収める。実験はいずれも京都産業大学経済学部の授業として実施されたものであり、実験ごとに、実験説明書、実験結果、試験問題、解説を収める。

本事業は本年をもって終了するが、本プロジェクトに参加した研究者たちは、このプロジェクトで整備された環境と養われた経験を活かして、実験経済学および様々な分野での教育と研究を今後いっそう強力に進めていくであろう。プロジェクトを可能にし支援していただいた多くの方々と組織に感謝するとともに、プロジェクトの成果と経験をいっそう活かせるよう変らぬ御理解とご支援を期待する。

2009年3月16日

代表（プロジェクト・リーダー）小田宗兵衛

謝辞

研究科を代表して、本事業をご支援いただいた方々と組織に衷心よりお礼を申し上げます。

まず2001年度から2005年度までの私立大学学術研究高度化推進事業（オープン・リサーチ・センター整備事業）「経済学 教育の新しい方法と、それによる経済学教育の社会的効果の研究」の継続事業として、本事業を私立大学学術研究高度化推進事業として選定・補助をいただいた文部科学省に厚く謝意を表したい。また本事業は文字通り「オープン」リサーチ・センターとして、京都産業大学の枠をこえ、内外の多くの大学や研究機関に属するさまざまな専門分野の多くの大学院生や若手研究者の参加によって運営され、多大の成果を挙げることができた。これもひとえにこの事業に賛同と支援をいただいた多くの方々と組織のご協力の賜物と、ここに厚くお礼を申し上げます。さらにご協力をいただいた多くの組織・資金提供機関・参加者に深謝するとともに、本事業の主催した実験や授業に参加してくれた本学の学生諸君にも感謝したい。

京都産業大学学内に対しても感謝の言葉を述べることをお許しいただきたい。日本の私立大学では初めての本格的な経済実験室を設置し、PDやRAを採用して経済実験を大規模に進めるという事業を、私立大学学術研究高度化推進事業として8年にわたり支援していただいた学長および理事会に謝するとともに、通常の理工系プロジェクトとも人文社会系プロジェクトとも異なる本事業を円滑に進めるために尽力いただいた事務組織に感謝する。皆様のご尽力・協力のもと、本プロジェクトが、研究科の研究教育を活性化させ、優秀な若手研究者が多く養成されたことは大いに評価されよう。本プロジェクトを指導した小田宗兵衛教授と全てのプロジェクト・メンバーの労をねぎらうとともに、多くの研究教育成果とともにこのプロジェクトを終えられることを共に心から喜びたい。

本事業は今年度で終了するが、京都産業大学大学院経済学研究科は、プロジェクトの設備と教育経験・研究成果を活かして、今後も実験経済学および様々な分野での教育と研究をいっそう強力に推進していく所存である。今後ともご支援を賜われれば幸いである。

2009年3月16日

京都産業大学大学院経済学研究科長：柿野欽吾

第1部
プロジェクトの概要

目次

第1章	はじめに	3
1.1	本概要の目的と構成	3
1.2	謝辞	4
第2章	事業の概要	7
2.1	研究計画	7
2.2	研究組織	8
2.3	役割分担とプロジェクトの運営	9
2.4	外部の組織および研究者との連携	10
2.5	研究支援体制	11
2.6	施設と設備の整備	11
2.7	施設の利用状況	12
2.8	活動と成果	13
第3章	研究の概要	15
3.1	研究実験	15
3.1.1	制度の発生	16
3.1.2	道路網における出発時刻の選択	17
3.1.3	談合防止制度の設計と検証	18
3.1.4	インターネット・オークションの設計と検証	18
3.1.5	社会的ジレンマと持続可能な経済	18
3.1.6	ロボット・トレーダーのいる市場	21
3.1.7	ネットワーク囚人のジレンマ	22
3.1.8	多市場接触	22
3.1.9	社会的ジレンマと小集団への帰属意識	23
3.1.10	時間選好	24
3.2	教育実験	25
3.2.1	競争市場実験	26
3.2.2	複占市場実験	27

3.3	神経経済学実験	29
3.3.1	時間選好と不確実性評価	29
3.4	理論研究	32
3.4.1	計算可能性	32
3.4.2	自己組織化	33
第4章	成果と展望	35
4.1	成果	35
4.1.1	経済学研究	35
4.1.2	経済学教育	35
4.1.3	研究者養成	36
4.2	反省点	37
4.2.1	経済学研究	37
4.2.2	経済学教育	38
4.2.3	研究者養成	38
4.3	まとめと展望	38
4.3.1	実験から誰が何を学んだか	38
4.3.2	プロジェクトの今後	39
付録A	活動記録	43
A.1	実験	43
A.2	研究会	47
A.3	国内会議	53
A.4	支出	59
A.4.1	支出実績の概要	59
A.4.2	施設と設備の概要	61
A.4.3	年度別支出実績	63
付録B	研究成果	67
B.1	図書	67
B.2	論文	68
B.2.1	研究論文	68
B.2.2	プロシーディング	73
B.2.3	その他	79
B.3	報告	80
B.3.1	国内学会	80

	3
B.3.2 国際学会	87
B.3.3 セミナー・ワークショップ	93

平成18年度～平成20年度
私立大学学術研究高度化推進事業
オープン・リサーチ・センター整備事業
『経済実験による研究と教育：
実験から誰が何を学ぶか』
の活動と研究の概要

小田宗兵衛

2009年3月

第1章 はじめに

1.1 本概要の目的と構成

京都産業大学大学院経済学研究科は、2001年度から2005年度まで実施した私立大学学術研究高度化推進事業（オープン・リサーチ・センター整備事業）「経済学教育の新しい方法と、それによる経済学教育の社会的効果の研究」（以下 ORC1 と略称する）の継続事業として、2006年度から2008年度まで『経済実験による研究と教育：実験から誰が何を学ぶか』（以下 ORC2 と略称する）を実施した。本概要は、後者の活動と成果をまとめて示す。内容は昨年秋（2008年11月）に提出した本プロジェクトの『研究成果報告書概要』と重なるが、所定の書式にとらわれずプロジェクトの活動と成果をまとめた。これによって、ORC2が、実験経済学と経済学教育の研究と研究者養成を目指して事業主体（京都産業大学大学院経済学研究科）を超えて様々な専門と所属の若手研究者と大学院生が主体的に研究するという ORC1 の特色を継承するとともに、神経経済学を含む新しい実験に取り組んだことがいっそう分かりやすく示されたと思う。

第2章は3年間の ORC2 の活動の要約、第3章は研究成果の概説、第4章は両者を総合してのまとめと今後の見通しである。付録 A と付録 B は、それぞれプロジェクトの研究活動（実験と研究会）と研究発表（学会報告と著作）の記録である。

本概要は、プロジェクト・リーダー（小田）の責任でプロジェクトの活動と成果を概観するものである。第3章の研究成果の概説と第4章のまとめと今後の見通しは、プロジェクト・メンバーとの意見交換に基づくもので広くメンバーに共有されていると信じるが、全てのメンバーに完全に共通するものではないであろう。本概要の責任はプロジェクト・リーダーだけに属する。個別研究については、付録 B の参考文献に直接に当たられることを希望する（主要なものは、本報告書の第2部に収められている）。

研究活動と研究成果の発表までには時差があり、本報告書ではまだ報告するのに十分なほど纏まっていないものも多い。それについては、プロジェクト終了後も下記のプロジェクトの Web サイトを維持し、順次公開するつもりである。

プロジェクトの Web サイト：<http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/project/orc/execo/>

1.2 謝辞

プロジェクト・リーダーとしてプロジェクトを代表して、多くの人々と組織に厚く感謝する。

まず文部科学省に感謝する。本プロジェクトを私立大学学術研究高度化推進事業オープン・リサーチ・センターに選定・助成いただき、適切な助成政策のもと、実験経済学の研究と人材養成を進めるという当初の目標を達成できたことを嬉しく思う。

支援をいただいた多くの学外の人々や組織にお礼を申し上げる。

実験経済学の初歩的知識もなしに始めた ORC1 のときに比べると、プロジェクト知識と経験が蓄積されたので、直接に指導や支援を受けることは少なくなったとはいえ、日本の実験経済学研究を牽引してこられた西條辰義大阪大学社会経済研究所教授の理解と支援があることはプロジェクトにとって何よりの安心感であった。

筒井義郎大阪大学大学院経済学研究科教授には、行動経済学会会長としての広い視野から、研究と教育の両面で助言と助力をいただいた。

上田完次東京大学人工物工学研究センター教授には、新しい問題意識と人材を絶えず供給いただいた。じっさい ORC1 に引続き ORC2 でも、教授が指導した（指導している）若手研究者たちはプロジェクトに重要な貢献をした。

新たに ORC2 で神経経済学研究を始めるに際しては、渡邊正峰東京大学大学院工学研究科准教授の指導を受け、実施にあたっては ATR-Promotions 脳活動イメージングセンタ（とりわけ正木信夫事業部長と能田由紀子研究員）にお世話になった。

故北村隆一京都大学大学院工学研究科教授には、優秀な人材を紹介いただくとともに、新しい経済実験の可能性について多くの示唆を得た。教授が2009年2月に急逝されたことは、プロジェクトにとっても痛恨事であった。

Nick Feltvick アバディーン大学教授には、2度にわたり ORC2 の会議に参加いただき、プロジェクト全体および個々のメンバーの研究に有益な助言をいただいた。

以上の方々のほか内外の多くの研究者から、多くの助言や助力を直接間接にいただいた。厚くお礼を申し上げる。

京都産業大学からのプロジェクトに対する理解と支援にも感謝する。

学長・理事会には、本事業の申請と活動に理解と支援をいただき、経済学学部長および経済学部同僚にはプロジェクト・メンバーと私がプロジェクトに最大限の時間を使えるよう御配慮いただいた。じっさい研究を構想調書どおりに進められたのは、大学および研究科の揺るぎない支援があればこそであった。

効率的な研究支援をいただいた事務組織にも感謝する。申請書類の作製から始まって、最終年度末の成果報告書の作製に至るまで、全ての業務を完璧にこなしていただいただけでなく、時々適切な提案と行動をいただくことでプロジェクトの企画は迅速に実現した。

学内の先輩および同僚の理解と協力にも感謝する。とりわけ藤井宏コンピュータ理工学部教授および奥田次郎コンピュータ理工学部准教授には、脳科学の初歩から最新の研究状況にいたるまで多くのことを教えていただいた。

プロジェクト・リーダーとして、プロジェクトに参加した全ての研究者と院生に感謝する。

八杉満利子京都産業大学名誉教授には、プロジェクトの研究に貢献いただくとともに、研究活動と若手研究者の育成の両面においてプロジェクト・リーダーの足りない点を適切に補っていただいた。

飯田善郎京都産業大学経済学部准教授には、プロジェクトの研究と教育に様々な貢献をいただいた。とりわけ最終年度は、本プロジェクトの唯一の学内共同研究者として、最終成果報告会などプロジェクトの業務の多くを担っていただいた。

様々な立場から本プロジェクトに参加してくれた学内外の若手研究者や大学院生諸君にも感謝している。プロジェクト・リーダーに研究方針と業務分担の両面で試行錯誤が続き、必ずしも最善の環境でなかったにもかかわらず、プロジェクトに積極的に関わって成果を上げてくれたことに感謝する。本プロジェクトは研究者養成を目指すものであり、諸君の研究者としての出発や成長が本プロジェクトの最大の収穫である。京都産業大学での実験経済学プロジェクトは本年度をもって終了する。今後は、諸君自らが研究環境を整え新たな研究に挑んでほしい。

最後に、プロジェクト・リーダーとしてではなく一研究者として個人的謝辞を述べることを御許し願いたい。

いま ORC1 と ORC2 の合計 8 年間にわたるプロジェクトを終えようとして感じるのは、学部・大学院の頃に教えを受けた先生がたへの感謝である。本プロジェクトのために直接に指導を受けたのではなく、勝手に謝辞を述べられるのもご迷惑かもしれないが、京都、ミラノ、ブライトンで私を指導していただいた諸先生・諸先輩に感謝する。溝川喜一京都大学名誉教授、(2007年2月に逝去された) 故菱山泉京都大学名誉教授、森口親司京都大学・大阪大学名誉教授、瀬地山敏京都大学名誉教授(現在鹿児島国際大学学長)、Luigi L. Pasinetti ミラノ聖心カトリック大学名誉教授、Nick von Tunzelmann サセックス大学教授、有賀佑二中央大学教授、馬場靖憲東京大学教授。みな新しいことに果敢に取り組まれる先生がたであり、先生がたの研究に対する態度に接していなければ、新しい研究領域で研究教育に挑むことはできなかったであろう。私自身の研究成果は先生がたからの学恩に報いるには不十分であるが、本プロジェクトを通じて、先生がたの精神が次の世代に引継がれていけば幸せである。

家族にも感謝する。この8年間の多忙のため家族に負担をかけた。とりわけ2005年以降は、深刻なものではないとはいえ、3度の入院をし、妻に苦勞をかけた。このほかにも多くの友人・知人の支えがあったことに深く感謝する。プロジェクト・メンバーの各々も、周囲からの様々な支援に感謝しているであろう。このようなプロジェクトに参加できたことを幸運に思う。

第2章 事業の概要

2.1 研究計画

本プロジェクト（ORC2）は、2001-2005年度私立大学学術研究高度化推進事業（オープン・リサーチ・センター整備事業）「経済学教育の新しい方法と、それによる経済学教育の社会的効果の研究」（ORC1）の継続事業である。

先行事業である ORC1 は、国内初の大規模な実験経済学プロジェクトとして

- 経済実験室の建設
- 経済実験による研究と教育の基盤整備
- 実験経済学研究者の養成

を目指して2001年4月に開始され、所期の成果をあげて2006年3月に終了した。すなわち、2002年3月に情報化された経済実験室を建設し、様々な実験研究（合計186回のべ参加者3943人）を行い、成果を内外の専門誌や学術会議（2004年12月14-17日には、実験経済学の創始者でノーベル賞受賞者のバーノン・スミス教授を基調講演者に迎え、林原共済会とともに国際会議を主催した）で発表するとともに、実験研究に興味のある大学院生に実験室を開放して様々な支援を与え、実験経済学研究者を養成した（実験室での研究で5名が東京大学、京都大学、大阪大学、神戸大学（2名）から博士号を取得した）。

以上の活動を発展させるために、ORC2は

- 新たな研究課題への取組
- 新たな実験手法の開発
- 次世代の研究者の養成

を目指して2006年4月に開始された。具体的には、人間の意思決定や学習過程が重要になる実験研究に取組み、経済的意思決定をする人間の脳活動の計測実験を導入し、新しい経済実験の知識と技術をもつ人材の育成を目標とした。

2.2 研究組織

本プロジェクトは、2006年4月に以下の10名で開始された。

小田宗兵衛（秀典） 京都産業大学経済学部教授（プロジェクト・リーダー）

八杉満利子 京都産業大学理学部教授

飯田善郎 京都産業大学経済学部助教授

中島義裕 大阪市立大学大学院経済学研究科助教授（京都産業大学客員研究員）

岩崎敦 九州大学大学院システム情報科学科助手（京都産業大学客員研究員）

野澤孝之 大学評価・学位授与機構助手（京都産業大学客員研究員）

濱口泰代 名古屋市立大学大学院経済学研究科講師（京都産業大学客員研究員）

井寄幸平 広島修道大学経済科学部講師（京都産業大学客員研究員）¹

舛本現 京都産業大学大学院経済学研究科特定研究員

小林洋平 京都産業大学大学院経済学研究科特定研究員

その後、中島（2006年度）と舛本（2007年度）がプロジェクトを離れ、新たに秋山英三（2006年度）と金進英（2008年度）がプロジェクトに加わった。そのほかにメンバーの変更はないが、昇進・移動・退職・職名変更のため、2009年3月のプロジェクト終了時点におけるメンバーと所属・職名は以下の通りになった。

小田宗兵衛（秀典） 京都産業大学経済学部教授（プロジェクト・リーダー）

八杉満利子 京都産業大学客員研究員

飯田善郎 京都産業大学経済学部准教授

秋山英三 筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授（京都産業大学客員研究員）

岩崎敦 九州大学大学院システム情報科学科助教（京都産業大学客員研究員）

野澤孝之 東京農工大学工学部特任助教（京都産業大学客員研究員）

濱口泰代 名古屋市立大学大学院経済学研究科准教授（京都産業大学客員研究員）

¹プロジェクト申請時点では、日本学術振興会特別研究員PD、京都産業大学客員研究員）

井寄幸平 広島修道大学経済科学部准教授（京都産業大学客員研究員）

小林洋平 京都産業大学大学院経済学研究科特定研究員

金進英 京都産業大学大学院経済学研究科特定研究員

以上の研究者に加え、3年間を通じて

米田紘康 京都産業大学大学院経済学研究科博士後期課程

灰谷綾平 京都産業大学大学院経済学研究科博士後期課程

がリサーチ・アシスタント（RA）としてプロジェクトに参加した。

2.3 役割分担とプロジェクトの運営

本プロジェクトの研究組織は、第2.2節に記載の通りであり、多くの客員研究員が参加した。じっさい事業の主体となる組織は京都産業大学大学院経済学研究科であるが、同研究科に所属する専任教員は、ORC1に引続き2名（小田・飯田）にすぎない。プロジェクトは、文字通りオープン・リサーチ・センターとして機能した。

とはいえ、プロジェクトに参加する学外研究者は、専任教員または特定研究員として京都産業大学に所属してORC1に参加した実績があるか、プロジェクト・リーダーと共同研究の実績があり、プロジェクトとしてのまとまりに不安はなかった。たとえばプロジェクト終了時点の6名の客員研究員のうち、4名（八杉・野澤・濱口・井寄）は専任教員または特定研究員として京都産業大学に所属してORC1に参加した実績があり、残りの2名（秋山・岩崎）も複数の科学研究費補助金などでプロジェクト・リーダーと共同研究をしており、学内者同様に密接な共同研究が可能であった。

プロジェクトは固有の構成員と研究課題をもつ下位組織には分割されず、個人あるいは数人のチームで個別研究課題が追求された。ただしプロジェクトの方向性を保ち、研究者の養成と実験室と運営を効果的に進めるため、京都産業大学に研究教育拠点をもつ3名の研究者は、それぞれの研究課題の追求に加えて、以下のように責任を分担した。

小田宗兵衛 研究代表者としてプロジェクトを統括する。

八杉満利子 研究代表者を補佐して研究者の養成にあたる。

飯田善郎 経済実験室の運営と研究会の開催にあたる。

以上によってプロジェクトは、各チームの研究の連携、プロジェクト研究資源の効率的配分、大学院生の多面的研究指導を実現した。

プロジェクトの所属するPDおよびRAは、実験実施のための組織を作って、プロジェクトの実験を支えた。プロジェクト終了時点での分担は以下の通りであった。

小林洋平 実験室の情報環境の管理、実験グループへの技術支援。

金進英 実験室の情報環境の管理、実験グループへの技術支援。

米田紘康 実験参加者の募集、謝金業務、実験参加者記録の管理。

灰谷綾平 実験参加者の募集、謝金業務、実験参加者記録の管理。

実験者は、希望する参加者の数と属性（たとえば特定の実験の経験者を除くなど）を上組織に伝えさえすれば、実験の参加者募集から実験後の参加者への謝金の支払までの全ての業務を任せられた。この組織の仕事は、ORC1以来の経験のおかげで、確実かつ効率的に確立されていた。実験者は、雑務に煩わされることなく実験の開発・実施・分析に集中できるという、PDとRAは、各自の研究課題の追求とプロジェクトの活動への参加のための時間を十分にとることができた。

2.4 外部の組織および研究者との連携

正式にオープン・リサーチ・センターあるいは京都産業大学と提携を結んでいる組織はないが、プロジェクト・リーダーが客員研究員を努める東京大学人工物工学研究センター共創工学部門（上田完次教授・西野成昭助教）との協力関係はORC1開始から続き、経済学と工学の両領域に及ぶ研究教育活動を推進している。

さらにORC2から始めた神経経済学研究のため、けいはんな学研都市のATR-Promotions脳活動イメージングセンタ（Brain Activity Imaging Centre: BAIC）で、必要な知識と技術を習得してfMRIを使用した。具体的には、MRI装置内の被験者に対する刺激提示アプリケーションと脳活動画像の画像解析アプリケーションを、（BAICに外注する費用で両アプリケーションの講習会を依頼することで）研究グループ内に独力でできる人材を育成し、同センターの機能的核磁気共鳴画像装置（fMRI）を利用（有料）した。

これら以外にも、プロジェクト・リーダーおよびプロジェクト・メンバーは、内外の多くの研究機関（英国University of Aberdeen、ドイツMax-Planck-Institute for Research into Economic Systemsなど）に属する研究者とともに様々な研究を進めている。

既述のように、本プロジェクトは京都産業大学に属さない多くの研究者を客員研究員として迎えて研究を推進したが、さらにプロジェクトに公式には属さなかった院生・研究者もプロ

プロジェクトに貢献した。とりわけ以下の研究者・院生は、プロジェクトの実験室で実験研究を継続的に実施した（所属は2009年3月現在）。

小川一仁 大阪産業大学大学経済学部准教授

西野成昭 東京大学人工物工学研究センター助教

藤川武海 国立マレーシア科学大学 (Universiti Sains Malaysia) 准教授

鈴木真介 理化学研究所脳科学総合研究センター理論統合脳科学研究チーム研究員

川村哲也 京都大学大学院経済学研究科博士後期課程

これらのうち、小川と西野はORC1からの助言・助力を受けて実験経済学研究で学位を取得した研究者であり、藤川・鈴木・川村はORC2の指導と援助のもとで学位を取得または取得見込みの研究者である。すなわち、ORC1に引続いてORC2も、実験経済学の開放的な教育機関として研究者の養成と支援をした。

このようにORC1とORC2で育った研究者が、内外の研究職に就くことで自然と連携と範囲が広がりつつある。とりわけNational Chengchi University（台湾）とUniversiti Sains Malaysia（マレーシア）の両大学からは、実験経済学研究の始動に助言・助力を求められ、提携が具体化しつつある（特に後者の研究者は、3月27-28日の本プロジェクトの成果報告会に参加し、情報交換の予定である）。

2.5 研究支援体制

プロジェクトはプロジェクトの研究支援業務のために人員を雇用していないが、プロジェクトの主体である京都産業大学大学院経済学研究科と大学事務組織（直接には経済学部事務室、間接には総合研究事務室など）による支援を受けて、効率的に研究を進めた。

2.6 施設と設備の整備

ORC1で建設したオープン・リサーチ・センター（657m²）の実験室 Kyoto Experimental Economics Laboratory (KEEL)（75m²）と実験準備室（25m²）の設備の一部をORC2開始時に更新して利用した。更新した設備は以下の通りである。



図 2.1: 経済実験室 (KEEL)

品名 (用途)	型番	数量	設置場所
実験参加者用 PC	ThinkCentre M52 Small Celeron D 336	29	実験室
実験管理用サーバー	IBM xSeries Model 25X	2	準備室
実験者作業用 PC	IThinkCentre M52 Small P4-630/XPP	2	準備室
スイッチングハブ	シスコ 24 port 10/100 Catalyst Switch	2	実験室
ブロードバンドルータ	YAMAHA NetVolante RT47i	1	準備室

上記以外の実験室および実権準備室の装置、設備、機器、什器は、ORC1 の『研究成果報告書概要』記載の通りである。

2.7 施設の利用状況

2006年4月から2009年3月現在までのKEEL（定員28名）の利用実績は下表の通りである。

年度	研究実験	教育実験	合計
2006 (回数)	38	2	40
(人数)	834	130	964
(時間)	114	3	117
2007 (回数)	31	0	31
(人数)	740	0	740
(時間)	93	0	93
2008 (回数)	36	0	36
(人数)	566	0	566
(時間)	78	0	78
合計 (回数)	95	2	97
(人数)	2140	130	2140
(時間)	285	3	288

研究実験は参加者を学内で公募して授業時間外に実施されたものであり、教育実験は授業として実施されたものである。ただし上表において、研究実験は科研費など本プロジェクト以外の資金から実験参加者への謝金が支払われた実験を含み、教育実験は、教育効果を測定するために参加者と結果の管理を厳密に行った教育実験だけを表し、純粹に教育目的の行われた（参加者と実験結果を長期的に管理していない）実験を含まない。実験準備室は、以上の実験のときに必ず使われるのに加え、実験を実施するための準備や分析およびPD およびRA の日常的活動のために、ほぼ毎日利用された。

2.8 活動と成果

上述の支援と研究環境のもとで、研究と教育を推進した（プロジェクトの研究の概要は次章の通り）。ORC2は、ORC1のような大規模な国際会議を主催しなかったが、不定期に講師を招いて研究会を開催するとともに、2007年度と2008年度の末に海外から研究者を招いて成果報告会を実施した（付録Aに研究会の記録と報告会のプログラムを収める）。プロジェクト・メンバーの学会や学術雑誌での成果報告に努めるとともに（付録Bに発表の記録を示す）、ORC1の成果を基にプロジェクトの研究成果をバーノン・スミス教授ら指導的研究者の論文とともに単行本に纏めてSpringer社から出版した（図2.2）。



図 2.2:

第3章 研究の概要

本プロジェクトは、実験室での研究実験、実験室と教室での教育実験、脳活動計測装置 (fMRI) による実験、および理論研究を行った。以下、この順に研究課題と現時点での研究成果を概説する。以下 [A10] などは、付録 B の研究成果の文献番号であり、各研究の詳細に関心のある読者は、それを参考にされたい (本報告書の第2部に収められているものは、第2部第 XX 章などと明示されているが、最終原稿などであって、印刷される確定原稿とは内容・体裁ともに同一でないものもある)。

3.1 研究実験

実験者は、実験参加者の環境と動機を制御して、実験参加者に意思決定をさせる。本プロジェクトにおいて各研究者は各自の問題意識に従って様々な課題に対して自由に実験を行ったが、実験の目的は一般に以下の2つである。

- (a). 人間の意思決定を知る
- (b). 人間からなる体系の挙動を知る

たとえば確実な 1000 円と不確実な 2000 円のいずれを選ぶかと尋ねるのは (a) のための実験であり、取引規則を作って、それがうまく機能するかを調べるのは (b) のため実験である。すなわち実験者は、(a) のための実験では調べたい人間の意思決定を顕示させる環境をゲームにし、それに実験参加者を試させ、(b) のための実験では調べたい体系のモデルをゲームにし、それを実験参加者に試させる。あるいは同じことを実験参加者から見れば、参加者は (a) では被験者であり (b) では試験者である。もちろん、一つの実験が (a) と (b) の両方あるいはその相互作用を解明することを目指すこともあるが、研究対象と研究者の問題意識に応じて、おのずと重心が異なる。

以下、(b) の重いものから (a) の重いものへと順番にプロジェクト・メンバーの研究を紹介する。最初のもは、人間ではなく計算機エージェントを意思決定者とする計算機実験である：(a) の割合は 0 であり、もっぱら (b) 集団の動学を探究する。次の3つは、人間を実験参加者とする実験室実験である：研究の目的は望ましい (交通・談合防止・オークションの)

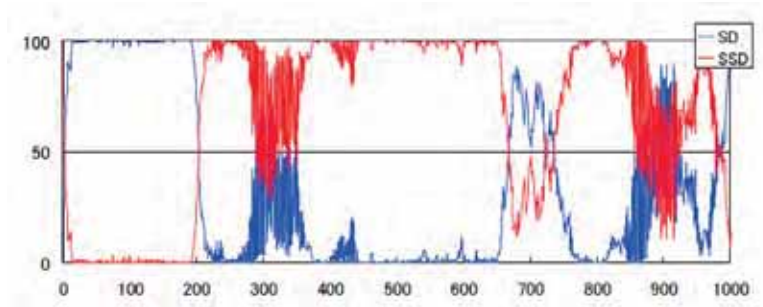


図 3.1: 各エージェントは、毎回、SD（懲罰なし社会的ジレンマのグループ）と SSD（懲罰あり社会的ジレンマのグループ）のいずれに属するかを選んでから同じグループの主体と対戦を繰り返す。図は、このときの計算機実験の結果を示す（縦軸は各グループの選ばれる割合を表し、横軸は対戦回数を示す）。一見すると、SSD に入る方が（懲罰を受ける主体にも与える主体にも費用がかかるため）SD に入るより利得は小さくなって SSD に属するエージェントの数は減っていきそうであるが、SSD グループは懲罰の存在によって協調行動を維持できるので、利得が上昇し、SSD を選ぶエージェントが増加して、協調が達成された。ただし、協調が支配的になると協調を維持するための懲罰コストを自ら負担しようとなないエージェントが増加し、崩壊は崩壊して再び SD が優勢となった。

制度を作ることであり、個人の行動を知る必要があるのは、主目的に影響を与えるかぎりにおいてである。続く 5 つの研究では (a) の重要性が増し、最後の研究では (a) だけが研究課題である：最後の実験は、直接に探求すべき経済体系をもたず、相互作用する対戦相手のいない 1 人ゲームで人間の意思決定（時間選好）を調べる。¹

3.1.1 制度の発生

社会的ジレンマ状況において協調行動を成立させるためには、制裁や罰則などの制度の導入が有効であることが、人間あるいは計算機エージェントを意思決定者とする多くの実験で観察されている（Aoki 2001）。しかし、多くの研究ではこれらの制度は外生的に与えられるものであり、その制度がどのように成立するかは十分に分析されていない。

小林洋平、舛本現、川村哲也は、エージェントの集団が自生的にグループを形成できるモデルを計算機内に構築し、社会的ジレンマ状況における利己的なエージェントのグループ形成を調べ、制度の成立と協調行動の関係を考察した（図 3.1、第 2 部第 10 章）。

¹各研究の概要は、目的が (a) にあるか (b) にあるかの判断も含めて、すべて本稿の筆者（小田）の判断であり、各研究者の理解とは異なるかもしれない。第 2 部に収録されている各研究者の論文を参照されたい。

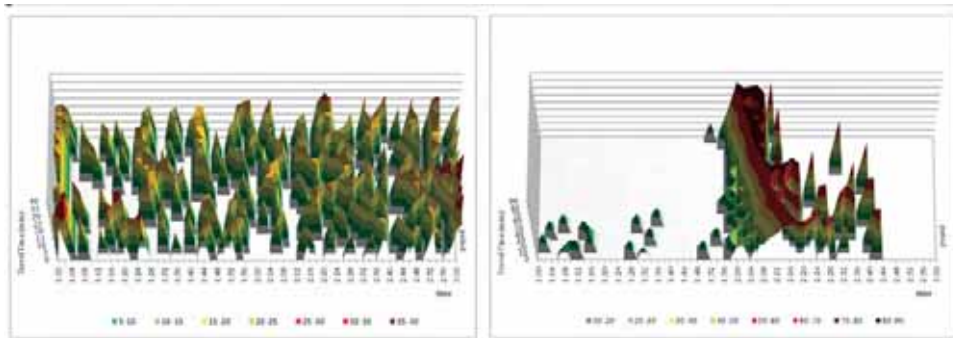


図 3.2: 遅延・早着に対する罰金の有無が出発時刻と所要時間に与える影響。延着に対して罰金が課されないとき（左図）と、課されるとき（右図）。両図とも、横に出発時刻（右ほど出発時刻が遅い）、縦に出発日（奥から順に1日目、2日目、...）、垂直軸は到着にかかる時間（緑<黄<赤）。実験参加者は、経験を増すにつれて出発時刻を変えていく。

3.1.2 道路網における出発時刻の選択

交通工学では、現行交通政策の評価や新規政策導入の効果をj知るために、モデルを構築し、設定条件に応じて交通現象がどう変化するかを計算機実験で調べる。モデルとしては、車両追従モデルや車線変更モデルなどの従来からの交通流モデルに加え、最近jは経路選択モデル、手段選択モデル、出発時刻選択モデルなど人の認知や心理を考慮するモデルが注目されている。しかし、人間の認知や心理に基づくモデルを構築するためには、実際に人間がどう意思決定をするかを知ること、および（計算機エージェントとは異なって）経験の蓄積や環境の変化に応じて意思決定の方法を変化させうる人間の相互作用がどのような影響を体系全体に与えるかを調べなければならない。

金進英は、ドライバーの出発時刻選択モデルの妥当性を調べるために、到着時刻制限の有無が出発時刻の選択にどう影響するかを知るための実験室実験を行った。実験では、全参加者の出発時刻の選択に応じて混雑（到達時間の増加）が起こる環境を実験室内に再現し、各参加者への謝金を到達までにかかる時間の長さに応じて変化させた。この標準的な実験経済学の方法に従うことで、意思決定者の環境と動機づけを制御し、現実的な道路条件を再現できた。実験は継続中であるが、到達までの時間の長さだけでなく早着あるいは延着に対して罰金が課されるか否か、混雑情報の提供があるかないか、などについて計算機実験とは異なる知見を得ている（図 3.2）。

3.1.3 談合防止制度の設計と検証

寡占企業間の談合を防ぐための制度として課徴金減免 (leniency) が注目されている。これは、談合に参加した企業でも、自ら談合の事実を認めて名乗りであれば、課徴金を減免するという制度である。この制度は既に諸外国でも日本でも導入され、成功例も報告されている (国内で最近のものは2008年11月に発覚した「鋼板カルテル事件」であり、米国の事例については同国の Department of Justice のサイトを参照)。しかし、うまく談合を摘発した事例を知ることではできても、摘発されない談合を外部から知ることではできないので、現実世界でどう機能しているか分からないことも多い。このようなとき、実験は有効な研究方法である。

濱口泰代は、共同研究者とともに KEEL でこの実験に取り組み、自己申告者に与えられる課徴金の減額を大きくしても談合摘発率はさほどあがらないが、報奨金を与えると談合摘発率が劇的に上昇することなどを発見し、さらに研究を続けている。この実験には、実験参加者間の情報交換を制御する必要があり、KEEL の情報環境と経験が活かされた (図 3.3、第2部第3章)。

3.1.4 インターネット・オークションの設計と検証

インターネット・オークションは急速に発展しつつあるが、ネットワークにおける匿名性を利用する不正入札の危険にさらされている。この問題が顕在化する前に、これについての理論研究・実証研究・実験研究を進め、不正入札に対して頑健なオークションを設計しなければならない。

岩崎敦は、共同研究者とともに、同一人物が複数の名義 (複数のメールアドレス) を用いて行う架空名義入札に注目し、その影響を受けないオークション方式を理論的に設計し、様々な分析を行っている。残念ながらまだ実験室実験を実施していないが、できるだけ早期に KEEL での実験を実施したい (図 3.4、第2部第11章)。

3.1.5 社会的ジレンマと持続可能な経済

全員が協力すれば社会全体にとっては最善でも、各人が自分一人くらいは協力しなくてもと思うと、誰も協力しない社会にとっては最悪の事態を招くという社会的ジレンマはよく知られ、多くの研究がなされている。このジレンマは、毎回の協力・非協力の効果が独立であるときにも深刻であるが、非協力の効果が未来に及ぶとき (今回非協力の人が多いと、次回以降の協力からの果実が減少するとき) には、どうなるだろうか？

西野成昭は、自身の指導する大学院生およびプロジェクト・リーダーの小田とともに、資源枯渇型環境 (資源ストックが閾値を下回れば終了) と環境悪化型環境 (資源ストックの減

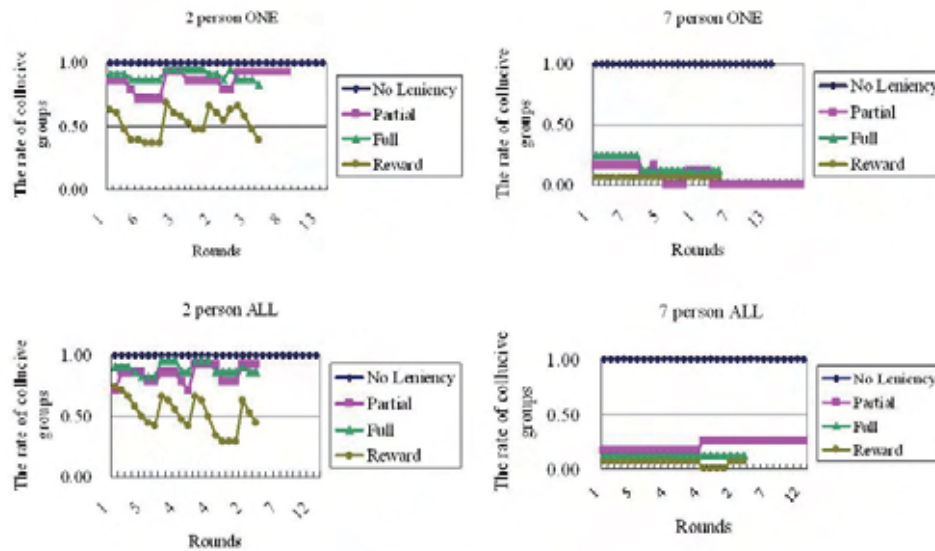


図 3.3: グループの大きさが課徴金減免の効果に与える影響。図の縦軸は、実験でカルテルが維持されたグループの比率を表す。参加者は、4つの課徴金制度（No Leniency, Partial, Full, Reward）のいずれかのもとで、カルテルに参加するか否かを決定した。ただし、No Leniency treatment では、カルテルへの参加を自白した者も、カルテルに対する課徴金を1円も減免されない。Partial treatment では、カルテルへの参加を告白した者は、カルテルに対する課徴金のうち87.5%を免除される。Full treatment では、カルテルへの参加を告白した者は、課徴金を全額免除される。Reward treatment では、課徴金減免者は、課徴金を課されないばかりか報奨金を受取る。さらにカルテルの大きさの与える効果を知るため、カルテルが2人で構成されるとき（左側の図）と7人で構成されるとき（右側の図）を実験した。これらから、(a) カルテルの大きさによらず、Reward treatment がカルテルに対して最大の破壊力をもつことと、(b) カルテルが大きいときには、どのようなものであれ課徴金減免があれば、カルテルの維持が困難になることが分る。

入札者	カレーだけ	コーヒーだけ	両方
A	0	0	1500
B	0	0	1000

↓

入札者	カレーだけ	コーヒーだけ	両方
A ₁	700	0	700
A ₂	0	800	800
B	0	0	1000

図 3.4: 架空名義入札の効果 (理論予想)。仮想的で極端な例であるが、入札者は A と B の 2 人だけで、両者の指定価格が上図であるとしよう。いま 2 位価格入札を行えば、A と B は正直に指定価格を申告し、A が 1000 円でカレーとコーヒを手に入れるだろう。ところが、ここで A が A₁ と A₂ の 2 人の入札者として下図のように入札するとしよう。すると、A₁ がカレーを、A₂ がコーヒーを入手する。カレーの価格は (A₁ の入札が 300 円を超えるかぎり、A₁ はカレーを入手できるから) 300 円となる。同様にしてコーヒーの価格は 200 円となり、A は 500 円でカレーとコーヒーを手に入れる。

以上の例では誰が購入するかは変化せず社会全体の総余剰に変化はないが、このような架空名義入札を各入札者が行くと、入札の結果は不安定になる可能性がある。このことについて理論研究だけでなく実験研究が必要である。

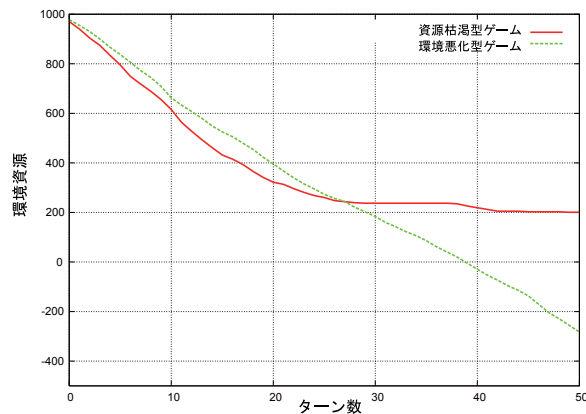


図 3.5: 資源枯渇型ゲームと環境悪化型ゲームにおける資源量推移。教育を目的とする実験ではなかったが、参加者のなかには、共有する資源をどう消費するか意思決定をすることで、現実世界の環境問題や持続可能社会であるためにどうあるべきかを学習したと感じた者もいた。

少とともに毎回の利得がかぎりなく減少) の場合について、KEEL で実験を行い、資源枯渇型環境では環境資源が閾値に近づくと協力が回復するが、環境悪化型環境では際限なく非協力が続くことなどを観察した。この結果は、資源の性質ごとに社会的ジレンマの動学が異なることを示唆し、この動学をよく理解して環境配慮行動を誘発するための制度設計をしなければならないことを含意する。現在さらに複雑な状況での実験を重ねつつ、ネットワーク外部性のあるときの消費者の行動の研究を調べている (図 3.5、第 2 部第 7 章)。

3.1.6 ロボット・トレーダーのいる市場

金融市場におけるバブルの発生と崩壊は金融市場が生まれたときからであろうが、近年は金融技術や情報環境の進歩にもかかわらず、あるいは進歩のために、崩壊の規模と影響が深刻である。じっさい 1980 年代以降に本格化した技術のひとつにロボット・トレーダーがあるが、これが、市場に残る利益に速やかに気づいて不均衡を消去し市場の効率化に貢献するどころか、バブルの発生と拡大の原因のひとつではないかと疑われている。

秋山英三は、指導する大学院生とともに KEEL でこの実験に取り組み、ロボット・プレイヤーの割合が高まるほどバブルが発生しやすいことを確認した。このような計算機実験と被験者実験の総合は、本プロジェクトの実験研究の多くを特徴づける ORC1 以来の方法論であり、さらに研究を深めている。たとえば、実験参加者が、ロボット・プレイヤーの割合が実際より大きいと誤認するとバブルは縮小する可能性がある。ただし、実験参加者に虚偽の

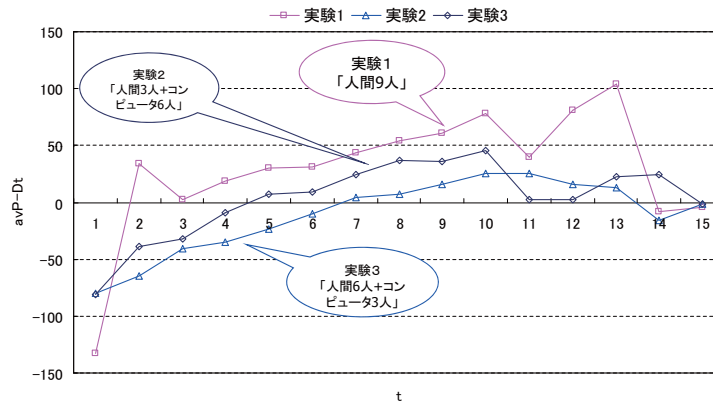


図 3.6: 縦軸は、資産の理論価格と取引価格の差を表す。グラフが横軸（中心線）より上にあるほど、バブルが大きい。

情報を与えると、それが発覚して今後の実験研究に悪影響を与える恐れがある（実験参加者が実験者の説明を疑うようになるかもしれない）。実験参加者を騙さないという制約のもとで、どのような誤認実験が可能かを検討中である（図 3.6、第 2 部第 9 章）。

3.1.7 ネットワーク囚人のジレンマ

ゲーム理論の分析では対戦相手は所与なときが普通だが、現実社会では誰と対戦するかを選択が可能で重要なときが多い。このような状況を端的に表現する理論模型がネットワーク囚人のジレンマで、各プレイヤーは対戦相手を選んで囚人のジレンマ・ゲームをプレイすることを繰り返す。

井寄幸平は、対戦相手を決める規則や各プレイヤーの過去の行動記録のうち何が誰に公開されるかが変わると、各プレイヤーの行動がどのように変化するかを実験室実験と計算機実験で調べている。最近の研究成果として、実験室では実験参加者は開示される情報が多いほど協力を達成し維持することや、計算機実験では期首から協力的だが相手の裏切には機敏に対抗するパラメータ値と初期値をもつエージェントほど好成績を残すことなどを確認している（図 3.7、第 2 部第 5 章）。

3.1.8 多市場接触

現実社会では、人間は同一人物と複数のゲームを同時にプレイすることがある。たとえば 2

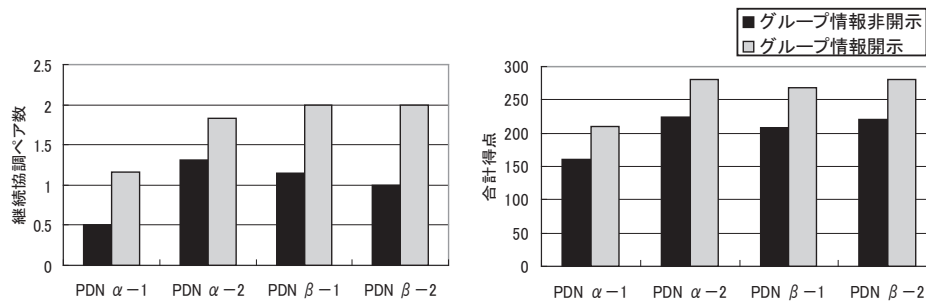


図 3.7: 行動情報の開示・非開示による結果の違い。被験者集団に他者の行動履歴を秘匿する場合と開示した場合の、継続的に同じ相手と協調するペア数と合計得点をそれぞれ示す。PDN α は指名によるペア形成、PDN β は指名+指名不成立の場合に強制的にペア形成をおこなう場合である。ただしハイフンの後ろの数字は、その実験が何回目を実施されたかを示す。

つの寡占企業が、商品 A をめぐっては暗黙の協調で互いに高い価格を維持する一方で、商品 B については激しい価格競争をすることもあろう。ゲーム理論の研究では、一般に互いに協力しにくいゲームでも、協力しやすいゲームと同時にプレイさせると、協力しにくいゲームでも協力が促進されるという予想 (Bernheim and Whinston, 1990) が知られているが、これは本当だろうか？

小川一仁は、小田らとともに、この予想を確かめるための実験を KEEL で実施した。結果は、この予想に反するものであった。すなわち実験参加者は、1 つのゲームをプレイするときよりも 2 つのゲームを同時にプレイするとき非協力的であった。しかし、この結果は、1 つのゲームをプレイするときよりも 2 つのゲームを同時にプレイするときのほうが取りうる戦略が増えてゲームが複雑化するためかもしれない。じっさいゲームの追加がゲームを複雑化しないように制御して実験すると、協力率の上昇が有意に観察された。この結果は理論的に興味深いだけでなく現実世界での含意をもつので、さらに研究を深めている (図 3.8、第 2 部第 12 章)。

3.1.9 社会的ジレンマと小集団への帰属意識

社会的ジレンマに個人として関わる時と小集団の代表者として関与するときでは、行動はどのように変わるだろうか？とりわけ代表者の小集団への帰属意識の強弱は、代表者の行動にどのように影響するだろうか？

飯田善郎は、Christiane Schwieren (University of Heidelberg) を共同研究者に、日本とス

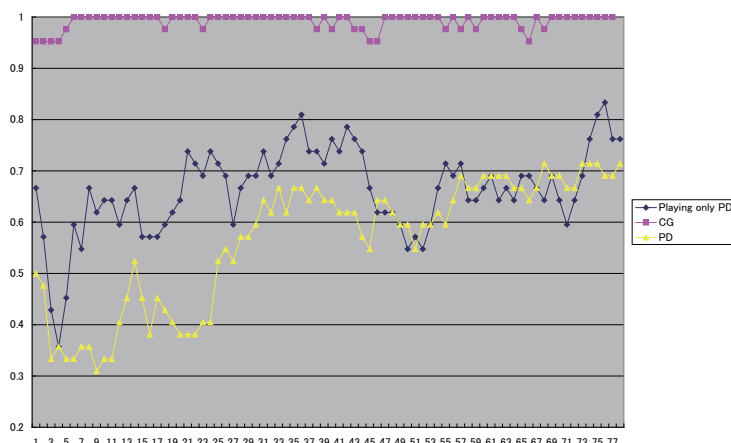


図 3.8: 囚人のジレンマだけをプレイするときの協力率の推移 (Playing only PD)、調整ゲームと囚人のジレンマを同時にプレイするときのそれぞれのゲームにおける協力率の推移 (PD, CG)。上図では、初めは PoPD のほうが PD より協力率が高いが、長期的には差はなくなる。利得行列しだいでは、PD のほうが長期的に協力率が高いときもある。

ペインで国際比較実験を行った。具体的には、被験者に、社会的ジレンマに個人として直面するゲームと、小集団の代表者として関与するゲームを、代表者と小集団構成員との親密度を小集団内での会話時間を統制して実施した。結果は、小集団ごとの親密度が高いほど代表者は協力的に振舞うが、その程度は日本よりもスペインで顕著であることを示唆するものであった。飯田は、この比較実験を続けるとともに、この実験に関連する実証研究として、個人が自身の所得を誰と比べるか（個人は誰と比較して、自分の所得を評価するか）を調べるための質問票調査を自らの科研費で実施するなど、実験研究と実証研究の総合を目指している（図 3.9、第 2 部第 8 章）。

3.1.10 時間選好

経済分析では、各人は将来所得を一定の率で割り引くと仮定することが多いが、多くの実験や実証研究は、人間は現在に近くづくほど割引率を大きくとることを示唆している。ただし、時間選好の実験には理論的にも実際的にも様々な困難があり、その結果として得られる個人の割引関数の形は実験ごとに大きく異なっている。

米田紘康は、小田の指導のもとで、時間選好の実験をしている。これは、KEEL での実験後に、実験参加者に「いますぐ実験謝金を受取ることもできますが、何週間か待てば割増つきで貰うこともできます」と、いくつかの質問を（正直に回答するメカニズムを組込んで）し

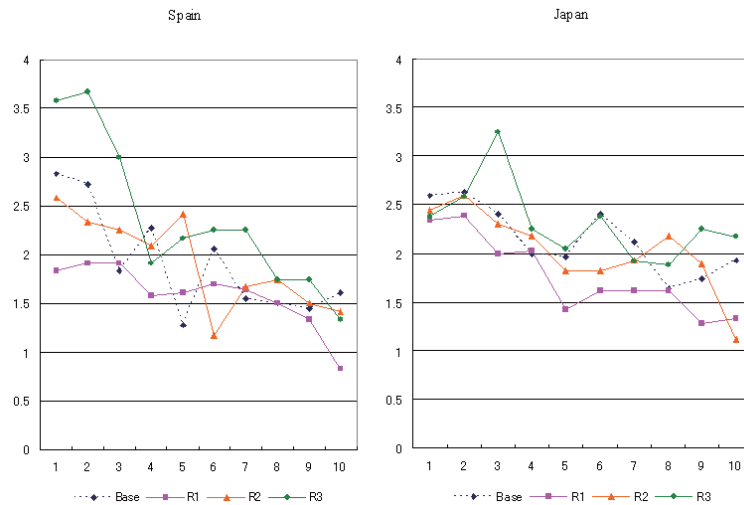


図 3.9: 集団間社会的ジレンマゲームの協調度：グループ代表でないとき（Base）よりもグループ代表であるとき（R1）の方が公共財ゲームにおける協調度が低下する。ただし、グループ内でのコミュニケーションをゲーム前に許すと、協調度は高まる（R2,R3）。

て、それに対する回答から各人の時間選好関数を推定するものである。この実験は、小額とはいえ自身が苦心して獲得した実験謝金の遅延実験という特色をもつとともに、本プロジェクトのように継続的に経済実験をしている実験者集団でなければできないものである。実験結果は、各人は、定率割引でも（現在に近くづくほど大きく割引く）双曲割引でもなく定額割引をしていることを示唆する。さらに実験を和田良子（敬愛大学経済学部准教授）と小田とともに継続するとともに、この実験を（後述の）本プロジェクトの脳活動計測実験の設計と分析に関連づけるための研究を進めている（図 3.10、第 2 部第 6 章）。

3.2 教育実験

経済実験は、経済学を教えるための良い教材である。じっさい ORC1 は、少人数の演習での教育実験に取組み、学生たちを被験者としてではなく実験者として実験に関わらせることで、教育効果をあげた。ORC2 は、多人数の講義科目における教育実験の効果を調べた。実験は、灰谷綾平が小田の指導のもとで設計・実施・分析した（実施した実験で学生に与えられた実験説明書、および実験の次の授業で学生に配られた資料と試験問題は、簡単な解説とともに、第 3 部に取められている）。

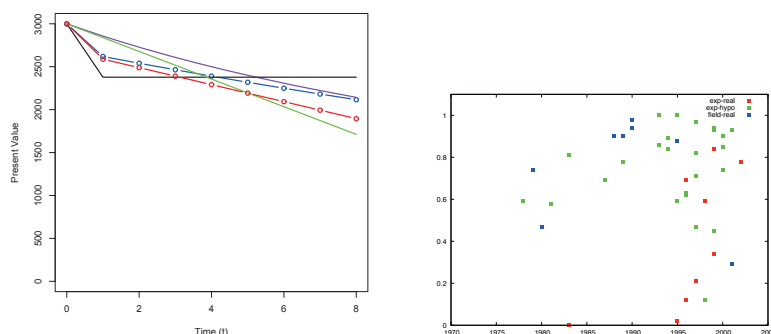


図 3.10: 左図:時間選好の測定結果はばらついている (Frederick, Loewenstein and O'Donoghue (2002) から作成)。横軸は研究の出版年、縦軸は測定された年割引因子 ($=1/(1+\text{年割引率})$)。右図:提案されている様々な時間割引関数 (横軸は週、縦軸は年割引因子)。赤線が、我々の実験結果と最も適合するとするとして新たに提案する関数。

3.2.1 競争市場実験

教室実験の目的は、教科書で説明されていることへの理解を深めるとともに、教科書で説明されていないことに気づかせることである。たとえば教科書の多くは、買手は選好に従って商品を購入し、売手は費用を考慮して商品を提供し、需要と供給の一致する均衡で取引が実現すると説明する。しかし、広場に買手と売手が集まれば、自然に市場が生まれるのではない。誰かが、取引のための設備・情報環境・規則を整備し、取引を秩序づけ取引者に規則を遵守させることで、初めて取引が滞りなく行われる。学生たちは、教科書を読むだけではこのことを見逃しても、実験に参加すれば具体的に体験して理解するだろう (さらに、需要と供給がどう一致させられるかや、一致しないときに取引がどう行われるかなど、教科書では明瞭に説明されていないことについても理解が深まるだろう)。このような目論みをもって、大教室での市場実験を ORC1 から様々な工夫をしながら続けてきた (図 3.11)

しかし、実験をする教員の希望に反して、学生たちは、真剣に取引をしなかったり、真剣に取引をしても何も学ばなかったりする。学生たちの多くは、スキナー箱のなかのラットのような学習をするだけで、箱の外からラットを観察する科学者の視点を持ってない。この危険は ORC1 のときから認識されていたので、(1) 学生に市場実験を経験させ (2) 必要なデータを与え (3) 自分の経験した市場の需要供給曲線を描かせる試験を、様々な教育上の工夫をしながら繰り返した。結果は期待したほどのものではなかったが、なにも実験をしないで試験をしたときよりも正答率が高まった (図 3.12)。



図 3.11: 競争市場の実験風景。参加者が多いため、神山コロシウム（京都産業大学野外劇場）で実施した。

3.2.2 複占市場実験

経済学部2年生配当科目「ミクロ経済学 A, B」で様々な複占市場の実験を行った（図 3.13）。さらに同じ実験を KEEL で研究実験として実施し、以下の観察などを得た。

- (a). 実験室では平等な均衡が速やかに達成される実験でも、教室では学生たちが自分の利得の最大化よりも対戦相手に勝つことを優先するので均衡が実現しないときがある（図 3.14）。
- (b). 教室では不平等な均衡が実現する実験でも、実験室では利得の配分が少なくなる方が反発してプレイヤーの行動がいつまでも安定しないときがある。

以上の結果は、ゲームの利得に応じて現金を得る研究実験と利益は仮想的数字にすぎない教育実験の差から来るように思われる。ただし、実験室実験と教室実験の間には謝金の有無以外にも様々な相違があるので、KEEL で固定謝金の実験を行うなどして原因の特定化を進めている。

原因のいかんによらず、教室実験の結果は研究実験から乖離するので、教員は、その方向と程度をよく理解して、教育実験の実施と実験結果の解説にあたらなければならない。実験が巧妙になるほど、実験参加者をゲームの利得に応じて変動する謝金で動機づけていないことが教室実験を困難にするが、（プロジェクトの別の教育実験が明らかにしているように）実験での成績と実験の理解に相関はないので、学生を成績で動機づけるのは好ましくない。現

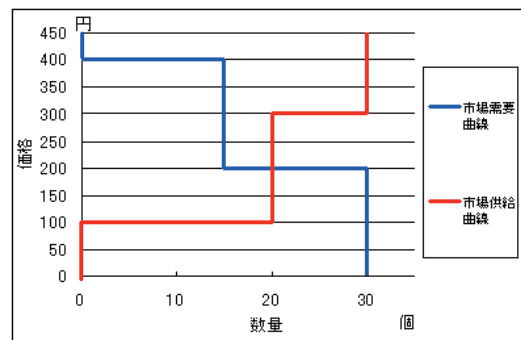


図 3.12: 学生たちに必要な情報「100 円以上なら売りたい人が 20 人、300 円以上なら売りたい人が 10 人、200 円以下なら買いたい人が 15 人、400 円以下なら買いたい人が 15 人います。ただし誰も 2 個以上の取引をできません。」を与えて、市場需要曲線と市場供給曲線を描かせる。正解は上の通りだが、ほとんどの学生たちが描けない。ミクロ経済学の初歩を勉強して限界費用曲線と平均費用曲線の関係などについての期末試験を合格した 2 年生も、上のような具体的な問題に対して答えられない。市場需要曲線と市場供給曲線が滑らかでなく階段であることが主要な困難ではなく、両曲線の基本的理解を欠いているからである (2 年生以上の授業で市場供給曲線の「定義」を尋ねても、最も多い答は「右上がりの曲線」である)。このことは市場実験に参加して自ら市場均衡を体験した学生でも同じであるが、市場実験と試験を繰り返せば、両曲線の意味を理解して正答率は上がる。ただし、そのためにかかる時間と手間を考えると、教科書に書かれていないことに気づかせるならともかく、書かれていることを理解させるためだけのために市場実験を繰り返すのは正当化されないだろう。とはいえ、実験を繰り返さないと実験を 1 回もしなかったときと同じく、ほとんどの学生は期末試験でも上図の正解を示せない。



図 3.13: 複占市場の実験風景。複占企業を演じる学生たちの意思決定をペアにして黒板に貼っている。

在 ORC1 と ORC2 の教育実験の成果をまとめるとともに、今後の経済学教育の研究と教材開発の次の計画を立案中である。

3.3 神経経済学実験

3.3.1 時間選好と不確実性評価

将来の確実な所得を評価するための脳活動と、不確実な現在の所得を評価する脳活動はどのように異なるかを調べるための実験を行った。実験は、米田紘康が小田の指導のもとで設計・実施・分析した。使用した fMRI は、ATR-Promotoions 脳活動イメージングセンタの 1.5 テスラ機である。

実験の手順 被験者は、MRI 装置の中に入り、合計 90 問の二者択一問題に答える。各選択肢は、金額（最大 8000 円）、受取確率（40%、80%、または 100% の 3 種類）、受取日（今日、1 週間後、または 2 週間後）の 3 つで特徴づけられ、被験者は、たとえば「3000 円を確率 100 パーセントで今日受けとる」と「8000 円を確率 40 パーセントで今日受けとる」のいずれが自分にとって望ましいかを答える。全 90 問のうち 45 問は、上例のように、受取期日は今日で同じで受取確率の異なる選択肢を比較する「危険比較」であり、残りの 45 問は、「5000 円を確率 100 パーセントで 1 週間後に受けとる」か「6000 円を確率 100 パーセントで 2 週間後に受けとる」のように、受取確率は 100 パーセントで同じで受取期日の異なる選

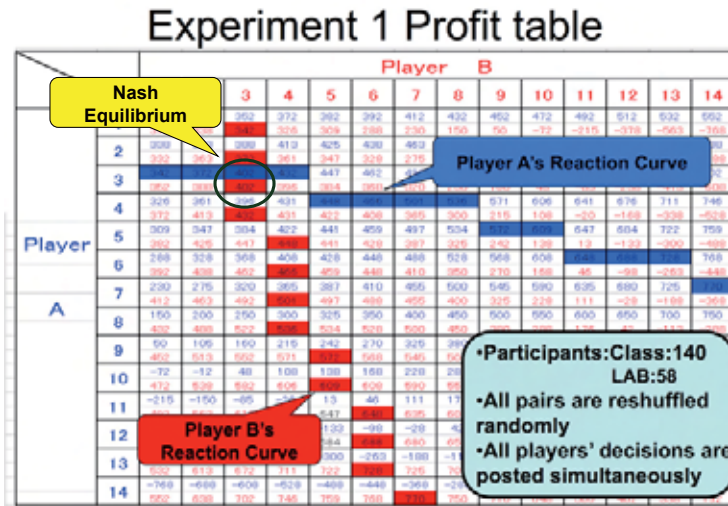


図 3.14: ベルトラン複占実験の利得表。まったく同じ実験指示書と利得表（上図）で実験をしても、利得に応じて謝金が支払われるときにはナッシュ均衡の結果 (3,3) が観察されるが、謝金が支払われない教室では (2,2) が実現する。自分が2を選べば、相手が何を選ぼうとも自分の得点が相手の得点より低くなることはない。もし2以外の値を選ぶと、相手の選び方によっては自分の得点が相手の得点を下回る可能性がある。このことから、学生たちは、（相手も相手自身の利益を最大化しようとしているという前提で）自分の利益を最大化するのではなく、相手がどんな行動をとろうとも自分は絶対に負けないことを目指して意思決定したと考えられる。

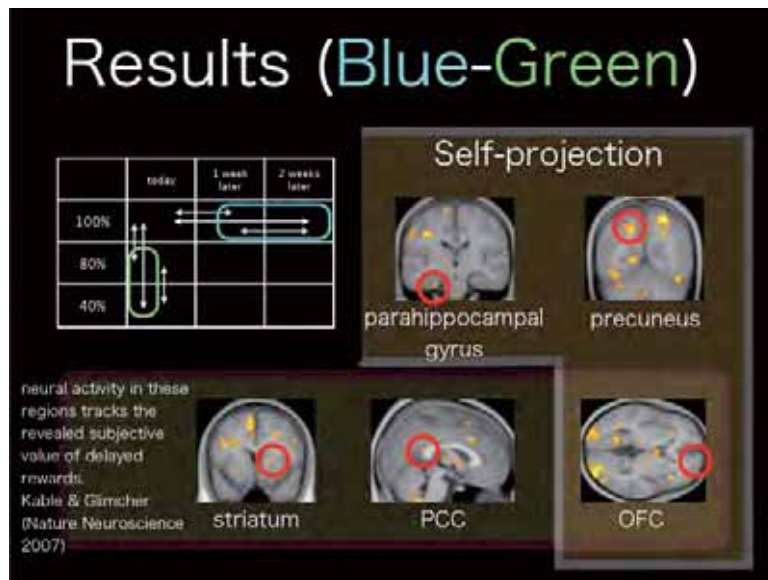


図 3.15: 不確実な報酬を選ぶより未来の報酬を選ぶときに賦活する領域: これらのうち OFC、striatum、PCC は、既存研究において将来報酬に対する主観的価値を顕示するときに賦活したと報告されている領域と重なるが、我々の実験では、「内側前頭葉-側頭葉-頭頂葉ネットワーク」に属する precuneus、parahippocampalgyrus、PCC および内側の OFC の一部が、危険比較のときよりも賦活した。

択肢を比較する「時点比較」である。被験者は、実験経済学の標準的方法によって、全ての問に対して正直に答えるように動機づけられる。

実験の結果 本報告書概要は、「時点比較」で未来（1週間後または2週間後）の報酬を選んだときの脳活動と、「危険比較」で不確実（40% または 80%）な報酬を選んだときの脳活動の集団比較の結果だけを示す。「危険比較」で不確実な報酬を選んだときのほうが「時点比較」で未来の報酬を選んだときよりも有意に賦活したのは、angular gyrus (BA39) であり、「時点比較」で未来の報酬を選んだときのほうが「危険比較」で不確実な報酬を選んだときよりも有意に賦活したのは、parahippocampal gyrus などであった（図 3.15）。

実験の解釈 危険比較と時点比較は、（詳細は省くが）標準的理論も人間行動の標準理論からの乖離も似ているが、異なる思考であることを示唆する。じっさい「危険比較」のときのほうが賦活した angular gyrus (BA39) は、一般に計算をするときに活性化するとされる領域であり、「時点比較」のときのほうが賦活した「内側前頭葉-側頭葉-頭頂葉ネットワーク」は、自分の視点を過去あるいは未来の自分や相互作用者や鳥瞰者に移動させる「自己投影

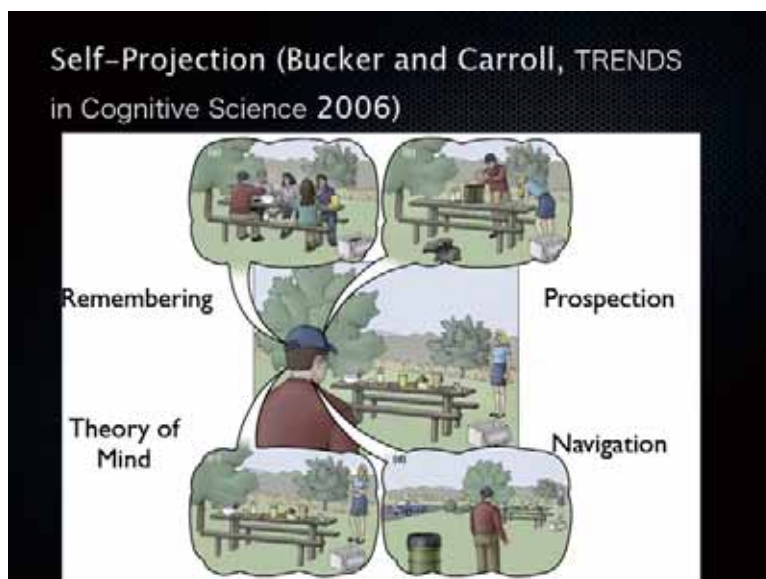


図 3.16: 自己投影：視点を、現在の自分から、過去の自分 (remembering)、将来の自分 (prospection)、自分の意思決定に影響する他人 (theory of mind) または観察者 (navigation) に移すこと。特に prospection のときには、記憶と関連して脳の活動が複雑である。未来報酬の評価が prospection に関わるとすれば、複雑で不安定なものであろう。

(self-projection)」(Buckner and Carroll, 2007) の神経基盤である。すなわち、自分の視点を未来の自分に動かして将来報酬の価値を判断したことを示唆する (図 3.16)。

以上の知見は、先行研究において時間選好が危険評価よりも一個人間でも同一個人についても一いつそうばらつき不安定な理由を説明するかもしれない。すなわち、時点比較は、その思考の難しさとそのための神経基盤「内側前頭葉-側頭葉-頭頂葉ネットワーク」の広がり両面で、危険比較のための計算よりも、被験者の経験や意思決定時の心的身体的状態や環境に強く複雑に依存し、その結果として不安定になる可能性がある。現時点でこれが時間選好が危険評価より不安定な理由と断定できないが、有力な仮説と思われるので研究を深めたい ([A2] 第2部第1章)。

3.4 理論研究

3.4.1 計算可能性

『実験から誰から何を学ぶか』という本プロジェクトの課題に関連して、人間の意思決定に関連する論理の研究を進めた。人間は、自分の視点を他者や自分の属する体系の外に移して

自分の思考体系や自分の属する体系について考察する能力をもつ。この「体系からの脱出」(Hofstadeter 1979) 能力をもつ人間は、自分自身の意思決定や学習を自覚する。自分自身の意思決定や学習を自覚する人間の意思決定は、自覚できない計算機エージェントの意思決定とどう異なり、人間からなる体系の動学にどのような特徴を与えるのか。これは ORC1 と ORC2 に共通する問題意識であり、実験研究とともに基礎的理論研究を続けてきた。

八杉満利子は、ORC1 の成果 (Yasugi and Oda 2002, 2003) をさらに進めて、有意な数学をアルゴリズムの見地から研究するとき、いわゆる自然数上の計算可能関数である再帰関数に加えて、再帰関数の極限值をとるという極限同定が必要になることに注目した。極限同定は各段階でよりよい極限候補を学習して気づかないうちに正しい極限值を得ることであるが、実験参加者もたとえば単純な強化学習を積み重ねて均衡戦略にいたるときがある。ただし厳密には有限回の強化学習では均衡に至らないときでも、実験参加者は次第にゲームの構造に気づいて均衡を発見するときがある。このことは、エージェントにとっての計算可能性と人間にとっての計算可能が異なることを示唆する。このことについて、無限回の計算とその結果という超限的な操作を計算と認めることの根拠を人間の構想力に求め、計算概念のコンパクト化と構想力による極限同定の認識の妥当化の研究を進めている ([A12] 第2部第4章)。

3.4.2 自己組織化

人間の「体系からの脱出」能力は、意思決定主体を静的で閉じた体系としては表現できないことを示唆する。主体が、多数の要素が相互作用する全体系のなかの、時間的にも空間的にも開かれている過渡的で境界が曖昧な体系だとすれば、それはどのように表現され分析されればよいだろうか。

野澤孝之は、以上の問題意識に基づき、transfer entropy など情報理論的な指標によって、要素間の因果的な結合性を評価し過渡的・相対的なシステムを定量的に記述する手法を研究している。この手法を連想ニューラルネットワークに適用すれば、ニューラルネットは、記憶されたパターン間の安定な連想の中では全体として強く閉じた「思いこみ」の状態として、安定な連想を離れると環境に開かれた「自己を疑って周囲を窺う」状態として記述されるであろう。さらに、このような記述は、経済学実験における参加者のゲーム体系への気づきやそこからの脱出の過程にも応用可能であろう。現時点では、過渡的・相対的なシステムの萌芽が人間よりも遥かに単純な系にも見出されることを示すため、基本的な物理法則を満たしながら高次の階層的自己組織化を実現する物理化学系のモデルを構築している ([A4]、第2部第3章)。

第4章 成果と展望

4.1 成果

4.1.1 経済学研究

実験室実験は、ORC1の実験よりも様々な面で進歩した。第3.1節で概説したように、各プロジェクト・メンバーは、単独または共同で、理論研究から実際への応用を目指すものまで様々な課題に対して、特色のある実験を実施し有意義な成果を得た。

神経経済学研究はORC2でまったくの初歩から始めた研究だが、第3.3節で概説したように、研究期間内にいちおうの成果を上げた。実験と分析に不十分な点が残るとはいえ、脳活動画像をブロック・デザインで撮るだけでなく、自己投影という最新の脳理論に基づく事象関連デザインとして実験を実現して分析したことは、神経科学あるいは神経経済学の研究として新しさと意義をもつ。

「体系からの脱出」というORC1開始以来の本プロジェクトの問題意識は、いっそう深められた。たとえばORC2で始めた脳活動計測実験で主役を演じた自己投影は、意思決定者の視点の移動であり、「体系からの脱出」である。自分自身や自分自身の属する体系について考える意思決定主体という人間理解は、神経経済学研究でも再確認された。

4.1.2 経済学教育

実験による経済実験は、学生たちの経済学理解を深めた。じっさい学生たちは、実験に参加することで、教科書に書かれていることを体験的に理解しただけでなく、教科書に書かれていないことに気づいた。たとえば学生たちは、売手も買手も誰一人として市場需要曲線も市場供給曲線も意識していなくても両曲線の交点に取引される価格と数量が引寄せられることを経験するとともに、それは教科書では明示されていない規則と情報環境によって取引が秩序づけられているからだと悟ることができた。すなわち学生たちは、実験によって、経済学の中かで考えるとともに経済学について考えるきっかけを与えられた。

プロジェクトは、実験による経済学教育の効果を組織的に調べ、それによって現状の経済学教育の欠陥と安易な教室実験の教育効果の限界を詳らかにした。上段落で述べた経済学効

果は、少数の学生に対して現れるにすぎない。「実験から誰が何を学ぶか」という本プロジェクトの間に対し「実験から多くの学生はほとんど学ばない」と答えるのは、否定的で寂しい。しかし、経済学教育の効果の研究は ORC1 のときよりも客観的かつ組織的になった。根拠に乏しい主観的希望を述べるよりも、客観的研究に基づいて問題点を提示するほうが望ましい。じっさい ORC1 では学部演習科目や中学生に対する公開授業での経済実験などの学習効果について学生の主観的な満足や理解を論じるだけだったが、ORC2 では講義での実験ひとつひとつの実験の理解度を試験や質問によって測定したので、信頼度は高く今後の教育改善の貴重な資料となりうる。(プロジェクト・メンバーの担当する数科目で実験による経済学教育を導入しても効果が大きくないのは、学部教育全般あるいは学生の勉学する意欲と能力に限界があるのかもしれない。じっさい経済学教育を受けると利己的になるかという調査も ORC1 以来続けたが、そのような傾向は見られなかった：就職活動の影響と考えられる4年生を除けば、協力度に学部学年による有意な差は認められなかった。しかし、経済学教育が失敗しているとすれば「経済学を理解しても考え方が変わらない」のではなく「経済学を理解していないから考え方が変わらない」のかもしれない。)

4.1.3 研究者養成

優秀な若者たちが所属と専門を越えて集まって新しい科学に取りくむのは、ORC1 から受継いだ本プロジェクトの特色であり、オープン・リサーチ・センターの趣旨に沿うものと確信する。じっさい ORC1 では、毎年1人の大学院生が京都産業大学の実験経済学環境を利用して博士論文を完成させ博士号を授与されたが、この伝統は ORC2 にも引継がれた。すなわち ORC1 の岩崎敦 (2002年、神戸大学博士 (学術))、井寄幸平 (2003年、神戸大学博士 (学術))、西野成昭 (2004年、東京大学 (工学))、濱口泰代 (2005年、大阪大学 (経済学))、小川一仁 (京都大学 (経済学)) に続き、以下の3名がプロジェクトからの設備の提供と支援を受けて行った実験を含む研究で博士号を授与された。

藤川武海 (2007) : “Experimental Economics and Small Decision-Making Problems”, University of Western Sydney, Australia.

鈴木真介 (2008) : “Evolution of cooperation with reputations: simulation and theoretical studies”, 筑波大学大学院システム情報工学研究科.

米田紘康 (2009) 『実験経済学とニューロエコノミクスによる異時点間選択の研究』, 京都産業大学大学院経済学研究科.

これらの若者たちに、所属する大学院では困難な経済実験を含む研究をする場を提供し、博士論文を完成させるための支援をしたことは、研究者養成型プロジェクトとして誇るべき成果である。

以上の研究者養成は社会全体に対する貢献であるが、京都産業大学大学院経済学研究科にとっても有益な経験であった。じっさい京都産業大学大学院経済学研究科にとって、米田紘康は7年ぶりの博士号取得者であり、初めての日本学術振興会特別研究員PD採用者である。これは、プロジェクトによって京都産業大学の学生・院生が実験経済学という新しい分野を勉強する環境を与えられたことに加え、(在籍者の少ない京都産業大学の大学院では不足しがちな)意見と情報の交換の機会をプロジェクトに参加する他大学の若手研究者や大学院生によって日常的に供給されたおかげである。

プロジェクトは、外部資金の導入と学内からの支援を受けて得意分野を確立し、開放的な研究環境のなかで他大学院の教育研究に貢献しつつ、自らの研究教育能力を高めるといふ、新しい大学院発展のあり方を示した。京都産業大学にかぎらず、大学院をとりまく環境は厳しいが、努力の集中と継続を今後も続けていっそうの発展をしたい。

4.2 反省点

4.2.1 経済学研究

本プロジェクトは、学外の様々な分野の院生や若手研究者を共同研究者として受入れて、実験経済学研究を推進をはかった。これは当初計画の通りであり、上記のように所期の成果を上げたが、プロジェクトが院生諸君の修士論文や博士論文を完成させることを優先したため、研究を論文として確定させることが遅れている。じっさいORC2の研究期間が3年と短いことを思えばやむを得ないが、第B章の論文の多くはORC1の研究成果に基づくものであり、ORC2で始めた研究は継続中のものが多い。とはいえ学会報告など特に後半はORC2の研究成果が増えているので、できるだけ早くプロジェクトで実施した研究の完成と成果の確定させたい。

神経経済学研究は、費用がかかる(被験者1人あたり約10万円)上に、研究者の持つ技術と問題意識の重なりが大きい。そのため、各人が各人の興味に従って各人の問題を研究するというよりも、共通の問題に対する先陣争いになりやすい。このなかで成果を上げるためには、十分な資金と入念な実験計画が求められる。本プロジェクトの神経経済学研究も、2008年度は資金不足で新たな実験を1回もできなかった。2007年度までの実験を完成させることができないまま、関連する新たな研究(Weber and Huettel 2008, Luhmann *et. al* 2008)がどんどん発表されるのを傍観するのは残念だった。なんとか資金を得て、できるだけ早く現在の研究を完成させ、次の研究に進みたい。

4.2.2 経済学教育

標準的な経済学教育の欠陥と安易な教室実験の教育効果の限界を詳らかにしたのは本プロジェクトの成果であるが、ではどうすればよいかという間にはまだ答えていない。じっさい対策を考える以前の問題として、教育効果の測定は長期的なものも短期的なものも当初の予想以上に難しく、査読に耐える研究論文の水準にまで研究が完成していない。

経済学教育の現状は厳しい。学生たちが経済学に対して示す興味も理解も非常に限定的である。教育上の困難のなかには京都産業大学経済学部固有のものもあれば、もっと一般性のあるものもあるだろう。教育効果の測定と教育法の開発のためには継続的な取り組みが必要なので、本プロジェクト終了後も努力を続け、時間と工夫をかけて研究として国際的に評価されるものにするとともに、現状の改善に取り組むつもりである。

4.2.3 研究者養成

実験経済学プロジェクトで毎年1人の博士（ORC1の5年間で5名、ORC2の3年間で3名）が生まれたのは成果である。さらに、これらの博士号取得者が研究機関に職を得て、研究を続けていることも喜ばしい（ORC1での博士号取得者はいまや全員が助教あるいは准教授であり、ORC2での取得者も取得後ただちに研究職を得ている）。問題だったのは、プロジェクトが大学院生の指導に時間をとられ、PDや（プロジェクトで学位を取得した）若手研究者との連携をとる余裕に乏しくなり、学位取得後の各自の研究の発展に十分に貢献できなかったことである。プロジェクトに参加する研究者の所属が地理的にも（国立マレーシア科学大学から筑波大学まで）学術的にも（文科系学部から理科系研究所まで）広がったことを長所として活用できるように、新たな関心と知識をもって独自の研究を進める研究者のネットワークを構築し、研究教育拠点としていっそうの飛躍を目指したい。

4.3 まとめと展望

4.3.1 実験から誰が何を学んだか

実験参加者が何をどのように学ぶか（学ばないか）については、第3.2節の教育実験だけでなく第3.1節の研究実験からも多くの知見を得た。

まず実験参加者の体系の中での学習について、様々な方法で—ネットワーク囚人のジレンマの実験（第3.1.7節）などでは計算機エージェントの意思決定との比較によって、時間選好の実験（第3.1.10節）などでは統計解析によって—様々な結果を得た。

実験参加者の体系についての考察についても、教育実験における肯定的あるいは否定的な様々な観察に加え、様々な知見を研究実験で得た。参加者は、ゲームの内の意思決定を求め

られるだけだが、自然にゲームの外から内に概念をもちこんだりゲームの内から外に推論を広げたりする。じっさい第3.1.6節（ロボット・トレーダーのいる市場）の実験を京都産業大学で実施したとき、参加者はロボット・トレーダーに対してもつ予断をゲームに持ちこみ、第3.1.5節（社会的ジレンマと持続可能な社会）の実験を東京大学で実施したときには、参加者は実験終了後の質問調査に対し「こういう構造だから環境問題は難しいんだ」と回答した。

エージェントは自らの意思決定を自覚できないが、人間は自らの意思決定を自覚できる。じっさい自分は何故このように考えるかと自省するのは、人間にとって可能というだけでなく必然である。そのために何も学ばないところは不可能であり、学習は必然である。プログラムは円周率をどこまでも計算できるが、人間は、この過程には終りが無いのではという予想をもち、それを証明する。働き蟻は何も悩まず働き続けるだろうが、人間は仕事の意味を考え、それに応じて働き方を変える。

このことが人間からなる体系に独特の安定性と不安定性を与える。人間がいるから起る事故もあれば、人間がいるから防いだり対処できる事故もある。教育においても、人間の体系からの脱出能力を適切に伸ばすことが求められる。

実験参加者や学生たちの学習のありかたも含め、けっきょく最も多くを学んだのは我々プロジェクト参加者なのだろう。学生たちが実験に参加しても多くを学べないと批判するのは酷なのかもしれない。たとえば私も、実験を ORC1 で始める前には、市場需要曲線と市場供給曲線を描いて交点で価格と生産量を決めて分析するだけで、均衡を実現させるための制度や均衡が実現しないときの市場の挙動など考えなかった。実験で具体的に取引を実現させなければならなくなって、初めて様々な問題に気づいて解決しなければならなくなった。外から観察される行動と意思決定者本人の意識する意思決定の差、人間の意識する意思決定とそれを意識させる脳活動の関係などを、研究対象として真剣に考えることはなかった。

「実験から誰が何を学ぶか」という観点から8年間の実験経済学プロジェクトを振り返ると、経済実験から最も多く学びうる、そして学ばなければいけないのは経済学研究者なのだ。このことに気づく機会を与えられたことに感謝するとともに、このことをいっそう説得的に明らかにする成果をあげるよう努力したい。これは、プロジェクト・リーダー個人の感想ではなく、プロジェクト・メンバーによって共有されていると信じて本プロジェクトを終了させよう。

4.3.2 プロジェクトの今後

本プロジェクト終了後も、ORC1 と ORC2 を担った研究グループ—様々な専門をもつ研究者が経済研究、とりわけ実験経済学と経済学教育のために、所属を超えて集まって作る機動部隊という意味で、Task Force for Experimental Economics and Economics Education (TF4E)

と自称する—は、新しい人材を加え、理論の検証から現実経済の理解を指向する研究へと実験経済学を発展させる体勢を整えている。じっさい2009年度には、国際シンポジウム『実験経済学神経経済学：人間行動と学習の視点から』を学内資金で実現させるとともに、(研究費を得られれば)京都大学大学院工学研究科都市社会工学教室と共同で京都市における市民の都市交通手段の選択についての野外実験を予定している。

京都産業大学経済学研究科は、2001年からの実験経済学プロジェクトによって、実験経済学の研究教育拠点となった。第2.4節で述べたように、いまや国内の実験経済学研究だけでなく海外の実験経済学の拠点形成にも関わっている。研究の継続と人材の育成に励み、拠点として期待される役割を果たさなければならない。

京都産業大学経済学研究科が実験経済学の研究教育拠点として存続するためには、実験施設を整備して維持することと、文書化されにくい知識の継承が重要である。研究者個人個人の研究費だけでは、PD・RAの人件費と実験室の情報環境の整備維持費用をまかなうことは難しい。京都産業大学は実験経済学プロジェクトを2009年度からの「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」で申請しないが、研究グループは、KEELで実験を行っている3名の博士後期課程の院生たちが博士論文を完成させて学位取得(うち1名は京都産業大学大学院経済学研究科から)をできるように責任を果たすと同時に、今後も研究教育に努めて学外からの資金と学内からの支援を受けられるよう努力し、この8年間で築いた有形無形の研究資産が失われないうちに、上記の研究計画を実現させて飛躍したい。

関連図書

- [1] Aoki, Masahiko (2001): *Toward a Comparative Institutional Analysis*, MIT Press, Cambridge, Mass., USA; 滝沢 弘和・谷口 和弘【訳】(2003): 『比較制度分析に向けて (新装版)』, NTT 出版.
- [2] Bernheim, Douglas B.& Michael D. Whinston (1990): “Multimarket Contact and Collusive Behavior” *RAND Journal of Economics*, in vol. 21, no. 1, pp. 1-26.
- [3] Buckner, Randy L. & Daniel C. Carroll (2007): “Self-projection and the Brain”, in *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 11, pp.49-57.
- [4] Frederick, Shane & George Loewenstein & Ted O’Donoghue (2002): “Time Discounting and Time Preference: A Critical Review”, in *Journal of Economic Literature*, vol. 40 (June), pp. 351-401.
- [5] Hofstadter, Douglas R. (1979): *Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid, 20th anniversary edition*, Basic Books, New York, USA; 野崎昭弘・はやしはじめ・柳瀬尚紀【訳】(2005): 『ゲーデル, エッシャー, バッハ—あるいは不思議の環 (20周年記念版)』, 白揚社.
- [6] Luhmann, Christian C & Marvin M. Chun & Do-Joon Yi & Daeyeol Lee & Xiao-Jing Wang (2008): “Neural Dissociation of Delay and Uncertainty in Intertemporal Choice”, in *Journal of Neuroscience*, vol. 28 (53), pp. 14459-14466.
- [7] Weber, Bethany J. & Scott A. Huettel (2008): “The neural substrates of probabilistic and intertemporal decision making”, in *Brain Research*, vol. 1234, pp.104-115.
- [8] Yasugi, Mariko & Sobei H. Oda (2002): “A Note on the Wise Girls Puzzle”, in *Economic Theory*, vol. 19 (no. 1), pp. 145-156.
- [9] Yasugi, Mariko & Sobei H. Oda (2003): “Notes on Bounded Rationality”, in *Scientiae Mathematicae Japonicae*, vol. 57 (no. 1), pp. 83-92.

付録A 活動記録

プロジェクト期間中の研究活動を示す。プロジェクトの活動として実施したものだけを示し、メンバーが個人の資格で活動したものを含まないが、ORC2以外の資金との共催であったり、ORC2に属さない研究者との協力に基づいて行われたものを含む。

A.1 実験

*印がついたものはORC2以外の資金である。

経済学実験（学内）

2006年度

資金	実験日	実験場所	被験者	実験内容	参加人数
*	2006年4月19日	KEEL	本学学生	グループゲーム	27人
	2006年4月19日	KEEL	本学学生	時間選好実験	27人
*	2006年4月22日	KEEL	本学学生	グループゲーム	21人
	2006年4月22日	KEEL	本学学生	時間選好実験	21人
	2006年5月24日	KEEL	本学学生	ネットワーク外部性実験	24人
	2006年5月27日	KEEL	本学学生	グリーン購入ゲーム	24人
	2006年6月7日	KEEL	本学学生	繰り返し囚人のジレンマ	18人
	2006年6月7日	KEEL	本学学生	時間選好実験	18人
	2006年6月10日	KEEL	本学学生	繰り返し囚人のジレンマ	27人
	2006年6月28日	KEEL	本学学生	繰り返し囚人のジレンマ	26人
	2006年7月1日	KEEL	本学学生	繰り返し囚人のジレンマ	22人
	2006年8月2日	KEEL	本学学生	評判つき社会的ジレンマ	24人
	2006年8月2日	KEEL	本学学生	時間選好実験	24人
	2006年8月3日	KEEL	本学学生	評判つき社会的ジレンマ	24人

	2006年8月3日	KEEL	本学学生	時間選好実験	24人
*	2006年10月11日	KEEL	本学学生	チームゲーム	18人
	2006年10月11日	KEEL	本学学生	時間選好実験	18人
*	2006年10月14日	KEEL	本学学生	チームゲーム	18人
	2006年10月14日	KEEL	本学学生	時間選好実験	18人
*	2006年10月25日	KEEL	本学学生	第1封印価格オークション	24人
*	2006年10月28日	KEEL	本学学生	第1封印価格オークション	24人
	2006年11月22日	KEEL	本学学生	繰り返し囚人のジレンマ	21人
	2006年11月25日	KEEL	本学学生	繰り返し囚人のジレンマ	14人
	2006年12月2日	KEEL	本学学生	ネットワーク外部性実験	27人
	2006年12月2日	KEEL	本学学生	スタッグハント実験	26人
	2006年12月6日	KEEL	本学学生	ネットワーク外部性実験	27人
	2006年12月13日	KEEL	本学学生	スタッグハント実験	24人
	2006年12月13日	KEEL	本学学生	スタッグハント実験	24人
	2006年12月13日	KEEL	本学学生	所得再分配の選好	24人
	2006年12月16日	KEEL	本学学生	スタッグハント実験	27人
	2006年12月16日	KEEL	本学学生	時間選好実験	27人
	2007年2月17日	KEEL	本学学生	ネットワーク型囚人のジレンマ	16人
	2007年2月17日	KEEL	本学学生	スタッグハント実験	16人
	2007年2月21日	KEEL	本学学生	ネットワーク型囚人のジレンマ	24人
	2007年2月21日	KEEL	本学学生	スタッグハント実験	24人
	2007年3月14日	KEEL	本学学生	評判つき社会的ジレンマ	12人
	2007年3月14日	KEEL	本学学生	時間選好実験	12人
	2007年3月17日	KEEL	本学学生	評判つき社会的ジレンマ	18人

2007年度

資金	実験日	実験場所	被験者	実験内容	参加人数
*	2007年4月18日	KEEL	本学学生	リニエンシー制度実験	26人
*	2007年4月21日	KEEL	本学学生	リニエンシー制度実験	20人
*	2007年5月9日	KEEL	本学学生	グループゲーム	18人
*	2007年5月9日	KEEL	本学学生	所得再分配の選好	18人

*	2007年5月12日	KEEL	本学学生	グループゲーム	25人
*	2007年5月12日	KEEL	本学学生	所得再分配の選好	24人
*	2007年5月30日	KEEL	本学学生	グループゲーム	24人
*	2007年5月30日	KEEL	本学学生	所得再分配の選好	24人
*	2007年6月2日	KEEL	本学学生	グループゲーム	24人
*	2007年6月2日	KEEL	本学学生	所得再分配の選好	25人
	2007年6月20日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	26人
	2007年6月20日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	26人
	2007年6月23日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	28人
	2007年6月23日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	28人
*	2007年7月11日	KEEL	本学学生	リニエンシー制度実験	28人
*	2007年7月14日	KEEL	本学学生	リニエンシー制度実験	28人
	2007年8月1日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	22人
	2007年8月1日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	22人
	2007年8月4日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	22人
	2007年8月4日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	22人
	2007年10月3日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	27人
	2007年10月6日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	27人
	2007年10月6日	KEEL	本学学生	時間選好実験	27人
	2007年10月24日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	18人
	2007年10月27日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	27人
	2007年12月12日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	28人
	2007年12月15日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	28人
*	2008年1月16日	KEEL	本学学生	教育効果実験	28人
*	2008年1月19日	KEEL	本学学生	教育効果実験	19人
*	2008年2月20日	KEEL	本学学生	教育効果実験	19人
*	2008年2月23日	KEEL	本学学生	教育効果実験	12人

2008年度

資金	実験日	実験場所	被験者	実験内容	参加人数
	2008年4月16日	KEEL	本学学生	教育効果実験	19人

	2008年4月19日	KEEL	本学学生	教育効果実験	20人
	2008年5月7日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	24人
	2008年5月10日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	20人
*	2008年6月18日	KEEL	本学学生	リニエンシー制度実験	27人
*	2008年6月21日	KEEL	本学学生	リニエンシー制度実験	25人
	2008年7月9日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	25人
	2008年7月11日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	18人
	2008年8月2日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	18人
	2008年8月6日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	18人
	2008年10月11日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	22人
	2008年10月15日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	20人
	2008年10月29日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	20人
*	2008年11月5日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	22人
*	2008年11月12日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	18人
	2008年11月12日	KEEL	本学学生	動的ネットワーク型囚人ジレンマ	18人
*	2008年11月15日	KEEL	本学学生	動的ネットワーク型囚人ジレンマ	18人
	2008年11月15日	KEEL	本学学生	ダブルオークション	18人
	2008年11月26日	KEEL	本学学生	コーディネーションゲーム	25人
	2008年11月29日	KEEL	本学学生	コーディネーションゲーム	27人
	2008年12月17日	KEEL	本学学生	繰り返し囚人のジレンマ	27人
	2008年12月20日	KEEL	本学学生	繰り返し囚人のジレンマ	22人
	2009年1月14日	KEEL	本学学生	交通ネットワーク実験	23人
	2009年1月17日	KEEL	本学学生	交通ネットワーク実験	28人
	2009年2月18日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	22人
	2009年2月21日	KEEL	本学学生	ディクテーターゲーム	22人

f-MRI実験（学外）

2006年度

資金	実験日	実験場所	被験者	実験内容	参加人数
	2006年11月8日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	2人

	2006年11月15日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	3人
	2006年12月13日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	2人
	2006年12月13日	BAIC	学外者	時間および確率リスク選好	1人
*	2006年12月25日	BAIC	学外者	時間および確率リスク選好	1人
	2007年2月20日	BAIC	ORCメンバ	時間および確率リスク選好	2人
	2007年2月22日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	3人
	2007年3月9日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	4人
	2007年3月22日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	3人

2007年度

資金	実験日	実験場所	被験者	実験内容	参加人数
*	2007年7月4日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	3人
*	2007年7月31日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	3人
	2007年8月2日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	2人
	2007年9月12日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	2人
	2007年9月20日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	2人
	2008年2月28日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	2人
	2008年2月29日	BAIC	本学学生	時間および確率リスク選好	2人

A.2 研究会

プロジェクトの研究会などの主催（共催）について年度ごとに示す。なお直接の経費が当事業以外から支出されている活動でも、プロジェクトと密接な関係があるものは、それを明記の上で記載されている。

2006年

TF4E Seminar (KEEL ; 2006年1月14日)

報告者	Takashi Hayashi(テキサス大学オースティン校)
報告論 題	Information, Subjective Belief and Preference Regret Aversion and Opportunity Dependence
報告者	和田良子(敬愛大学)
報告論 題	Experimental Anaysis on the Effect of Ambiguous Informations on decision making of the investors
報告者	灰谷綾平(京都産業大学)
報告論 題	実験経済学による教育効果の検証

TF4E Seminar (KEEL ; 2006年2月9日)

報告者	Christiane Schwieren(ボンペイファブラ大学助教授)
報告論 題	Competition - a cure without side-effects?

TF4E Seminar (KEEL ; 2006年2月27日)

報告者	西野成昭(東京大学)
報告論 題	資源の長期共有を考慮した社会的ジレンマモデルによる環境配慮型行動の創発

TF4E Seminar (東京大学柏キャンパス 総合研究棟 5F 会議室 ; 2006年3月22,23日)

報告者	小田宗兵衛(京都産業大学)
報告論 題	多部門生産理論の基礎とその応用

TF4E Seminar (KEEL ; 2006年5月8日)

報告者	濱口 泰代 (名古屋市立大学)
報告論 題	An Experimental Study of Procurement Auctions with Leniency Programs

TF4E Workshop マルチゲーム研究会 (5号館2階 ミーティングルーム1 ; 2006年6月8日)

報告者	舩本現 (京都産業大学)
報告論 題	マルチゲーム研究の視点
報告者	小川一仁 (広島市立大学)・川村哲也 (京都大学)
報告論 題	多市場接触の基礎実験について
報告者	太田勝憲 (京都大学)
報告論 題	The Value of Information in Multimarket Contact
報告者	渡部幹 (京都大学)・上田祥行 (京都大学)
報告論 題	ゲーム連結と戦略の進化について
報告者	橋本康 (ERATO 合原複雑数理モデルプロジェクト)
報告論 題	複数のゲームを同時に行う集団の進化ゲームダイナミクス ~マルチゲームダイナミクス~

TF4E Seminar (KEEL ; 2006年9月15日)

報告者	和田良子 (敬愛大学)
報告論 題	An Experimental Analysis of Attitude toward Imprecise Information

TF4E Seminar (KEEL ; 2006年11月24日)

報告者	藤澤美恵子 (東京工業大学)
報告論 題	中古マンション市場の情報開示に関する研究

2007年

第4回CC-セミナー・LCMセミナー (京都産業大学第3研究室棟会議室2F ; 2007年2月20日)

報告者	灰谷綾平 (京都産業大学)
報告論 題	What Students Learn from Market Experiments and What They Don't

TF4E Seminar (京都産業大学5号館3階5301教室 ; 2007年2月26日)

報告者	飯田善郎 (京都産業大学)
報告論 題	稼得負担の主観的評価が所得再分配選好に与える効果
報告者	鈴木真介 (筑波大学)
報告論 題	多人数ゲームにおける直接互惠性と間接互惠性の比較
報告者	岩崎敦 (神戸大学)
報告論 題	Payoff levels, loss avoidance, and equilibrium selection in the Stag Hunt: an experimental study
報告者	金子陽平 (東京大学)
報告論 題	ネットワーク外部性市場における不完全情報下での新製品導入に関する研究
報告者	西野成昭 (東京大学)
報告論 題	不完備情報ゲームを用いた資源消費の意思決定に関する研究

TF4E Seminar (京都産業大学 5号館 3階 5301 教室；2007年2月26日)

報告者	濱口 泰代 (名古屋市立大学)
報告論 題	An Experimental Study of Procurement Auctions with Leniency Programs
報告者	小川 一仁 (広島市立大学国際学部講師)
報告論 題	多市場接触実験において相互協力を達成しうる戦略について
報告者	井寄 幸平 (広島修道大学)
報告論 題	ネットワーク型囚人のジレンマにおける情報構造の影響
報告者	灰谷 綾平 (京都産業大学)
報告論 題	What students learn from market experiments and what they don't

TF4E Seminar (KEEL；2007年4月20日)

報告者	川崎真弘 (東京大学生産技術研究所)
報告論 題	高次認知脳機能に関するfMRI研究：ワーキングメモリ・推論

2008年

TF4E Seminar (KEEL；2008年2月14日)

報告者	Syoken Fujisaki, Hiromichi kimura and Eizo Akiyama
報告論 題	The Effect of the Recognition of Other Players on the Emergence of Asset Bubbles in Laboratory Double Auctions
報告者	Yasuyo Hamaguchi, Toshiji Kawagoe and Aiko Shibata
報告論 題	Group Size Effects on Cartel Formation and the Enforcement Power of Leniency Programs

TF4E Special seminar (KEEL ; 2008年2月14日)

報告者	Juergen Bracht and Nick Feltovich
報告論 題	Correlated equilibria, good and bad: an experimental study
報告者	Nick Feltovich, Atsushi Iwasaki and Sobei Oda
報告論 題	Payoff levels, loss avoidance, and equilibrium selection in the Stag Hunt: an experimental study

TF4E Seminar (KEEL ; 2008年2月18日)

報告者	Gen Masumoto, Yohei Kobayashi and Tetsuya Kawamura
報告論 題	The evolution of cooperation by selecting games
報告者	Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama
報告論 題	Evolution of cooperation with reputations

TF4E Seminar (KEEL ; 2008年5月14日)

報告者	Marco Cassari(Purdue University)
報告論 題	PRE-COMMITMENT AND FLEXIBILITY IN A TIME DECISION EXPERIMENT

TF4E Seminar (KEEL ; 2008年5月19日)

報告者	朴勝俊 (京都産業大学)
報告論 題	再生可能エネルギー普及支援策に関する実験案

TF4E Seminar (KEEL ; 2008 年 5 月 24 日)

報告者	関絵里香 (アバディーン大学)
報告論 題	Fish auction formats: preliminary results

A.3 国内会議

実験経済学・経済学教育・ニューロエコノミクス ワークショップ“Understanding Economic Behaviour: Observers’ Description, Participants’ Introspection and Brain Activities”

2008 年 2 月 16 日 (土) – 17 日 (日)

多くの人々の意思決定プロセスは観察者の視点に基づく彼らの行動についての説明とどのようの関連があるのでしょうか？行動経済学はこの質問を考慮した新たな考えと所見をもたらしますが、行動理論と参加者の意思決定の内省的性質の関係は漠然としています。しかし昨今のニューロエコノミクスの発達はこの状況を変えるかもしれません。

これらの動機から私たちは「経済を理解するために人はどのように行動しなければならないのか」を議論するワークショップを組織します。

このワークショップでは経済教育のセッションも行われます。このセッションでは座学の経済学教育および経済実験についての考察をトピックとして議論されます。

これらのトピックに興味のあるかたのご参加お待ちしております。

今回のワークショップは私立大学学術研究高度化推進事業「オープン・リサーチ・センター」『経済実験による研究と教育：実験から誰が何を学ぶか』とウェスタンシドニー大学(UWS)の新たに開始される実験経済学プロジェクトとの共催で行われます。

2008 年 13 日から 15 日に Eduard Brandstatter, Nick Feltovich, Partha Gangopadhyay および TF4E メンバー によるワークショップも同時に開催されます。また 2008 年 2 月 18 日にも岩崎敦氏 (九州大学) 主催のセミナーが行われます。このセミナーでは Nick Feltovich (アバディーン大学, イギリス.) をゲストとして迎えます。

詳細については後日、オープン・リサーチ・センターHP
<http://www.cc.kyoto-su.ac.jp/project/orc/execo/>
をご参照下さい。

開催委員

小田 秀典 (京都産業大学)
飯田 善郎 (京都産業大学)
藤川 武海 (UWS)

プログラム予稿

2008年2月16日

12.00 - 13.00 受付開始

13.00 - 14.00 開会挨拶・歓迎挨拶

小田 秀典 (京都産業大学)

14.00 - 14.30 休憩

14.30 - 16.30 セッション A: Behavioural Decision Making

司会: 藤川 武海 (UWS, オーストラリア)

A1. 藤川 武海 (Universiti Tunku Abdul Rahman, Malaysia)

“Experiments on Small Decisions”

A2. 和田 良子 (敬愛大学)

“Behavioural Experiments on Intertemporal Preference and Decision-making under Uncertainty”

A3. 高橋 泰城 (北海道大学)

“Neuromodulation of Intertemporal Choice and Decision under Uncertainty”

16.30 - 17.00 ティーブレイク

17.00 - 18.00 キーノートスピーチ

Eduard Brandstätter (リンツ大学 オーストリア)

18.00-20.00 懇親会

2008年2月17日

10.00-12.00 セッション B: Neuroeconomics

司会: 灰谷 綾平 (京都産業大学)

B1. 米田 紘康 (京都産業大学)

“fMRI Experiments on Intertemporal Preference and Decision-making Under Uncertainty”

- B2. 鈴木 真介 (筑波大学)
“fMRI Experiments on Multi-person Games”
- B3. 奥田 次郎 (多摩川大学)
“Neuro Science of the Reward system”

12.00 - 13.00 昼食

13.10-14.30 セッション C: Economics Education

司会: 米田 紘康 (京都産業大学)

- C1. 灰谷 綾平 (京都産業大学)
“What Students Learn From Experiments and What they don’t”
- C2. 飯田 善郎 (京都産業大学)
“Does Learning Economics Affect Students’ Cooperative Mind?”

14.30-15.00 ティーブレイク

15.00-17.00 閉会挨拶・コメント

司会: 飯田 善郎 (京都産業大学)

1. Nick Feltovich (アバディーン大学, イギリス)
“Payoff levels, loss avoidance, and equilibrium selection in the Stag Hunt: an experimental study”
2. Nick Feltovich (アバディーン大学, イギリス)
Closing comments

懇親会 (土曜日 18:00～) 学生 ¥3000 一般 ¥5000

年度末報告会

“Understanding Economic Behaviour: Observers’ Description, Participants’ Introspection and Brain Activities”

2008年 3月27日（金）－28日（土）

京都産業大学実験経済学オープンリサーチセンター（代表研究者小田秀典）は2009年3月27日（金）、28日（土）の両日、実験経済学と神経経済学のワークショップを実施します。これはこれまでのオープンリサーチセンターにおける研究の総括と今後の研究の新たな発展に向けた研究交流を目的とするものです。

1日目は University of Aberdeen の Nick Feltovich 氏、Universiti Sains Malaysia の Ch’ng Kean Siang 氏、Adel Tajasom 氏、Zainal Ariffin 氏がそれぞれの実験研究と神経経済学研究成果を発表し、また海外での研究状況についての質疑に応じます。また京都産業大学の神経経済学研究成果も発表されます。

2日目はオープンリサーチセンターを中心に行われた経済学実験による学内外の研究者による制度研究およびその関連研究が中心となります。プログラムは以下の通りです。

プログラム予稿

Kyoto Sangyo University, Kyoto, Japan 27-28 March 2009
Meeting Room 1 Building 5 (Economics, Business Administration)

March 27 9:00～9:30 Welcome Address

Sobei H. Oda

10:00-12:00 Session A

A1. Nick Feltovich (University of Aberdeen)

“The role of strategic uncertainty in games: an experimental study of cheap talk and unstructured bargaining in the Nash demand game”

A2. Ch’ng Kean Siang (Universiti Sains Malaysia)

“Gift Exchange Experiments in Malaysia”

13:00-16:00 Session B

- B1.** Adel Tajasom and Zainal Ariffin Ahmad (Universiti Sains Malaysia)
“Neuroleadership and Decision Making”
- B2.** Zainal Ariffin Ahmad, Rapida Saimi, Adel Tajasom, and Hazim Omar (Universiti Sains Malaysia)
“Research on Decision Making (Neuroeconomics)”
- B3.** Zainal Ariffin Ahmad and Azura Abdul Halim (Universiti Sains Malaysia)
“Showcase: Neurosciences in Business at the Human Development Lab”

16:30-18:30 Session C

- C1.** Kazuhito Ogawa (Osaka Sangyo University)
“Labor” in the Experimental Dictator Games”
- C2.** Hiroyasu Yoneda (Kyoto Sangyo University)
“f MRI Experiments on International Preference and Decision-making Under Uncertainty”
- C3.** Jiro Okuda (Kyoto Sangyo University)
“Prediction, prospection, and planning”

March 28**10:00-12:00 Session D**

- D1.** Yasuyo Hamaguchi (Nagoya City University)
“The Mixed Effect of Voluntary Revelation: Evidence from Threshold Public Goods Game Experiments”
- D2.** Nariaki Nishino (Tokyo University)
“Economic Experiments on Club Member Service of Movie Theaters”
- D3.** Yuichiro Yamada and Eizo Akiyama (Tsukuba University)
“The effect of headline news in experimental asset markets.”

13:00-15:00 Session E

- E1. Jinyoung Kim (Kyoto Sangyo University)
“Departure time choice under early and late penalty”
- E2. Ryohei Haitani (Kyoto Sangyo University)
“What Students Learn from Market Experiments and What They Don’t”
- E3. Takemi Fujikawa (Universiti Sains Malaysia)
“Experimental Economics and Small Decision Making Problems”

15:30-16:50 Session F

- F1. Yoshio Iida (Kyoto Sangyo University)
“Whose income do you compare yours to?: a questionnaire investigation of real reference groups”
- F2. Mariko Yasugi (Kyoto Sangyo University)
“Cognition of computation by limiting recursion”

A.4 支出

A.4.1 支出実績の概要

(千円)

年度・区分		支出額	内訳						備考
			法人負担	私学助成	共同研究機関負担	受託研究等	寄付金	その他	
平成18年	施設	0	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	0	
	設備	0	0	0	0	0	0	0	
	研究費	19,480	19,480	0	0	0	0	0	
平成19年	施設	0	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	0	
	設備	0	0	0	0	0	0	0	
	研究費	14,543	14,543	0	0	0	0	0	
平成20年	施設	0	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	0	
	設備	0	0	0	0	0	0	0	
	研究費	15,013	15,013	0	0	0	0	0	
総額	施設	0	0	0	0	0	0	0	
	装置	0	0	0	0	0	0	0	
	設備	0	0	0	0	0	0	0	
	研究費	49,036	49,036	0	0	0	0	0	
総計		49,036	49,036	0	0	0	0	0	

※平成20年度は予定額。

A.4.2 施設と設備の概要

ORC1 で建設したオープン・リサーチ・センター (657m²) の実験室 Kyoto Experimental Economics Laboratory(KEEL) (75m²) と実験準備室 (25m²) の設備の一部を ORC2 開始時に更新して利用した。更新した設備は以下の通りである。

品名	型番	数量	設置場所
実験参加者用 PC	ThinkCentre M52 Small Celeron D 336	29	実験室
実験管理用サーバー	IBM xSeries Model 25X	2	準備室
実験者作業用 PC	IThinkCentre M52 Small P4-630/XPP	2	準備室
スイッチングハブ	シスコ 24 port 10/100 Catalyst Switch	2	実験室
ブロードバンドルータ	YAMAHA NetVolante RT47i	1	準備室

上記以外の ORC1 から継続した実験室および実験準備室の装置、設備、機器、什器は以下の通りである。

ハードウェア仕様

品名	型番	数量
被験者用液晶モニタ	MItsubishi RDT 152X	26
サーバー・作業用 PC 用液晶モニタ	Mitsubishi RDT 183S	4
プリンタ複合機	Fuji Xerox DocuCentre Color 320 CP	1

什器 (実験室)

品名	型番	数量
実験専用デスク	オカムラ DS20LN-MB51	28
デスクパネル	オカムラ DS00P	28
実験専用椅子	オカムラ CG14GZ-FM36	28
教卓	オカムラ 9304HZ-MB51	1
教卓用椅子	オカムラ CS25GS-FM16	1

什器 (実験準備室)

品名	型番	数量
OA テーブル	オカムラ D388EP-MB51	2
椅子	オカムラ CG14GZ-FM36	6
片袖デスク	オカムラ DS16LD-MB51	2
ホワイトボード	オカムラ 4380FB-H01	1
丸テーブル	オカムラ 8176BT M937	1
書架 (単式1連)	オカムラ 6L52DA-Z13	1
パーティション		2

AV 機器

品名	型番	数量
液晶プロジェクタ	横河 MAT D-3100	1
書画カメラ	横河 MAT DMC-27X	1
ビデオデッキ	ビクター HR-DVS2	1
アップコンバーター	デジタルアーツ DSC-06U	1
カセットデッキ	松下電器 RS-BX4010	1
RGB スイッチャー	ALTINEX MX2416RM	1
ハイパワーアンプ	松下電器 WA-H120	1
ワイヤレスユニット	松下電器 WA-XU01	1
チューナーユニット	松下電器 WA-D4000	1
ワイヤレスアンテナ	松下電器 WA-4950	2
ワイヤレスマイク (ハンド型)	松下電器 WA-4100	1
ワイヤレスマイク (タイピン型)	松下電器 WA-4900	1
スピーカー (天井吊り下げ)	松下電器 WS-A35H	2
スピーカー (天井埋め込み)	松下電器 WS-6500A	4
100 インチ電動スクリーン	オーエス ET-V100S	1
機器収納サイドキャビネット	(特注)	1
RGB 分配器	ALTINEX DA1907SX	1

A.4.3 年度別支出実績

(千円)

年度	平成 18 年度			
小科目	支出額	積算内容		
		主な用途	金額	主な内容
教育研究経費支出				
消耗品費	2,992	実験用消耗品	2,992	複合機使用料, ソフトウェア他
光熱水費	0		0	
通信運搬費	89	郵送料	89	実験用資料送付
印刷製本費	0		0	
旅費交通費	1,302	学会・研究会参加	1,302	国内旅費、外国旅費
報酬・委託料	2,733	被験者謝金、機器保守	2,733	被験者実験謝金、実験室機器保守料
(賃借料)	1,387	fMRI 装置使用料	1,387	fMRI 装置使用料他
計	7,136		7,136	
アルバイト関係支出				
人件費支出 (兼務職員)	0		0	
教育研究経費支出	0		0	
計	0		0	
設備関係支出 (1 個又は 1 組の価格が 500 万円未満のもの)				
教育研究用機器備品	4,518	実験用サーバ	4,518	マ実験用サーバ、ノートパソコン
図書	0		0	
計	4,518		4,518	
研究スタッフ関係支出				
リサーチ・アシスタント	2,256	被験者募集、実験補助 他	2,256	学内 2 人
ポスト・ドクター	7,680	実験記録管理, 謝金関係業務等	7,680	学内 2 人
研究支援推進経費	0		0	
計	9,936		9,936	学内 4 人

年度	平成 19 年度			
小科目	支出額	積算内容		
		主な用途	金額	主な内容
教育研究経費支出				
消耗品費	524	実験用消耗品	524	複合機使用料、プリンタラベル他
光熱水費	0		0	
通信運搬費	15	郵送料	15	
印刷製本費	0		0	
旅費交通費	981	研究会・	981	国内旅費, 外国旅費
報酬・委託料	2,041	被験者謝金, 機器保守	1,399	被験者実験謝金、実験室機器保守料
(賃借料)	701	fMRI 装置使用料	701	fMRI 装置使用料他
計	4,262		4,262	
アルバイト関係支出				
人件費支出 (兼務職員)	0		0	
教育研究経費支出	0		0	
計	0		0	
設備関係支出 (1 個又は 1 組の価格が 500 万円未満のもの)				
教育研究用機器備品	214		214	ノートパソコン
図書	0		0	
計	214		214	
研究スタッフ関係支出				
リサーチアシスタント	2,383	被験者募集業務, 実験補助等	2,383	学内 2 人
ポスト・ドクター	7,680	実験室情報環境の管理, 実験記録管理, 謝金関係業務等	7,680	学内 2 人
研究支援推進経費	0		0	
計	10,067		10,067	学内 4 人

年度	平成 20 年度			
小科目	支出額	積算内容		
		主な用途	金額	主な内容
教育研究経費支出				
消耗品費	753	消耗品	753	複合機使用料, 無線プレゼンリモコン他
光熱水費				
通信運搬費	15	郵送料	15	
印刷製本費	100	成果報告書	100	研究成果報告書作成
旅費交通費	1,885	学会・研究会	1,885	国内旅費, 外国旅費, 参加費
報酬・委託料	1,814	謝金及び業務委託料	1,814	実験参加者への報酬, 実験室ハードウェアの保守
(賃借料)	0		0	
計	4,454		4,454	
アルバイト関係支出				
人件費支出 (兼務職員)	0		0	
教育研究経費支出	0		0	
計	0		0	
設備関係支出 (1 個又は 1 組の価格が 500 万円未満のもの)				
教育研究用機器備品	0		0	
図書	0		0	
計	0		0	
研究スタッフ関係支出				
リサーチアシスタント	2,400		2,400	学内 2 人
ポスト・ドクター	7,680		7,680	学内 2 人
研究支援推進経費	0		0	
計	10,080		10,080	学内 4 人

付録B 研究成果

本章は、プロジェクトの公式メンバーと RA（第 2.2 節の小田・八杉・飯田・中島・岩崎・野澤・濱口・井寄・舛本・小林・秋山・金・米田・灰谷の 14 名）のプロジェクト期間における研究発表をまとめて示す。すなわち、各自がプロジェクトに公式に参加しているときに単独あるいは共同で発表した報告および著作を、内容と資金の出所が ORC2 と関係あるかないかと無関係に、発表の形態ごとに示す（著者名・報告者名のうち、上記 14 名には下線を付す）。じっさい各人のどの発表がどの資金によるものかを特定する事が困難であるうえに、研究活動と発表との時差があることを思えば、厳密に ORC2 期間中の ORC2 の研究成果の報告に限定して目録を作ることは、かえって恣意的で無意味になる。以下の一覧は、ORC2 の研究成果の一覧ではなく（プロジェクトの主要な成果はプロジェクト終了後に発表されるであろう）、プロジェクト・メンバーのプロジェクト期間における研究発表活動を表すものである。ただし、各自の専門分野における教育研究業績などは経済実験と直接に関連しそうなものも収録したが、間接的にも本プロジェクトに関係しないと思われるものは省略した。

なお*は、査読を経て発表されたものである（ただし査読の有無はプロジェクト・メンバーの自己申告に基づく）。口頭発表については、査読の有無が曖昧なため、国際会議も含めてすべて無査読とした。

B.1 図書

- Z1 Sobei H. Oda(2007 editor): *Developments on Experimental Economics: New Approaches to Solving Real-world Problems (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.590)*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, 2007.
- Z2 林晋・八杉満利子（訳・解説）（2006）: 「ゲーデル 不完全性定理」, 岩波書店（岩波文庫）, 309 頁.

B.2 論文

B.2.1 研究論文

- * A1 Takakazu Mori, Mariko Yasugi and Yoshiaki Tsujii(2009): “Fine-computable functions on the unit square and their integral” in *Journal of Universal Computer Science* (to appear).
- ★ A2 小田宗兵衛 (to appear): 「神経経済学は経済学に貢献するか？—時間選好の fMRI 実験を例に」, 『システム/制御/情報』第 53 巻 (第 4 号) 133-139 頁.
第 2 部第 1 章
- * A3 Yasuyo Hamaguchi, Toshiaki Kawagoe and Aiko Shibata (2009): “Group Size Effects on Cartel Formation and the Enforcement Power of Leniency Programs ” in *International Journal of Industrial Organization*, vol. 27, pp. 145-167.
第 2 部第 2 章
- * A4 Takayuki Nozawa and Toshiyuki Kondo (2009): “Construction of Reversible Lattice Molecular Automata” in *Mathematical Logic Quarterly*, vol. ?? (no. ??), pp. to appear.
第 2 部第 3 章
- * A5 Fuyuki Yoshikane, Takayuki Nozawa, Susumu Shibui and Takefumi Suzuki (2009): “An analysis of the connection between researchers’ productivity and their co-authors’ past attributions, including the importance in collaboration networks” in 79, vol. 1 (no. to appear), pp.
.
- * A6 Takakazu Mori, Mariko Yasugi and Yoshiaki Tsujii (2008): “Integral of two-dimensional Fine-computable functions ” in *Electronic Notes on Computer Science*, vol. 221, pp. 141-152.
- * A7 Takakazu Mori, Yoshiaki Tsujii and Mariko Yasugi (2008): “Integral of Fine computable functions and Walsh Fourier series ” in *Electronic Journal of Theoretical Computer Science*, no. 202, pp. 279-293.
- * A8 Takakazu Mori, Mariko Yasugi and Yoshiaki Tsujii (2008): “Effective Fine convergence of Walsh Fourier series” in *Mathematical Logic Quarterly*, vol. 54 (no. 5), pp. 519-534.

- * A9 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (2008): “Chaos, oscillation and the evolution of indirect reciprocity in n-person games” in *Journal of Theoretical Biology*, no. 252, pp. 686-693.
- * A10 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (2008): “Evolutionary stability of first-order-information indirect reciprocity in sizable groups” in *Theoretical Population Biology*, no. 73, pp. 426-436.
- * A11 西野成昭・金子陽平・小田宗兵衛・上田完次 (2008): 「ネットワーク外部性市場における不完全情報下での意思決定と製品普及プロセス」, 『情報処理学会論文誌』第49巻(第4号) 1527-1538頁.
- A12 八杉満利子 (2008): 「連続体上の計算概念について - 再帰関数を超えるもの -」, 『哲学論叢』第XXXV巻(京都大学哲学論叢刊行会編) 199-209頁.
第2部第4章
- * A13 花木伸行・秋山英三・石川竜一郎 (2008): 「コンピューター実験: 新しい理論分析への招待」, 『経済セミナー』(第642号) 29-32頁.
- * A14 櫻井祐子・岩崎敦・横尾真 (2008): 「適切な掲載数を決定するキーワード広告オークションの提案」, 『コンピュータソフトウェア』第25巻(第4号) 60-67頁.
- * A15 斎藤恭昌・岩崎敦・横尾真 (2008): 「チーム選択問題のための架空名義操作不可能なオークションメカニズムの提案」, 『コンピュータソフトウェア』第25巻(第4号) 199-207頁.
- * A16 Kouhei Iyori (2007): “Prisoner’s Dilemma Network: Experiments and Simulations” in *System Sciences for Economics and Informatics*, edited by Shusaku Hiraki and Michinori Sakaguchi, Kyushu University Press, pp. 35-49.
第2部第5章
- * A17 Sobei H. Oda and Gen Masumoto (2007): “A Note on Schredelseker’s Model: Private Information and Inference about Inference” in *Information, Interaction and (In)Efficiency in Financial Market*, edited by Michael Hanke and Jürgen Huber, Linde Verlag Wien, Wien, Austria, pp. 37-61.
- * A18 Sobei H. Oda (2007): “Formulating Non-proportionally Growing Economies: A Generalisation of Pasinetti’s Analysis” in *Bulletin of Political Economy*, vol. 1 (no. 2), pp. 129-159.

- A19 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (2007): “Evolution of compassion under un-repeated interaction” in *Advancing Social Simulation*, edited by eds. Takahashi, S., Sallach, D. and Rouchier, J., Springer, pp. 273-282.
- * A20 Nariaki Nishino, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (2007): “A Study on Decision Making and Institutional Design in Recycling System: An Analysis about the Market for Collecting Used Units” in *Systems and Computers in Japan*, vol. 38 (no. 8), pp. 20-31.
- * A21 Ryoko Wada and Sobei H. Oda (2007): “Separation of Intertemporal Substitution and Time Preference Rate from Risk Aversion: Experimental Analysis with Reward Designs” in *Developments on Experimental Economics: New Approaches to Solving Real-world Problems (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.590)*, edited by Sobei H. Oda, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, pp. 131-136.
- * A22 Takemi Fujikawa and Sobei H. Oda (2007): “Judgement in Small Decision-making Problems” in *Developments on Experimental Economics: New Approaches to Solving Real-world Problems (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.590)*, edited by Sobei H. Oda, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, pp. 149-154.
- * A23 Nariaki Nishino, Hiroki Nakayama, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (2007): “Recycling of Durable Goods: Modeling and Experiments” in *Developments on Experimental Economics: New Approaches to Solving Real-world Problems (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.590)*, edited by Sobei H. Oda, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, pp. 197-202.
- * A24 Hiroyasu Yoneda, Gen Masumoto and Sobei H. Oda (2007): “How to Use Private Information in a Multi-person Zero-sum Game” in *Developments on Experimental Economics: New Approaches to Solving Real-world Problems (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.590)*, edited by Sobei H. Oda, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, pp. 239-244.
第2部第6章
- * A25 Kazuhito Ogawa, Kouhei Iyori and Sobei H. Oda (2007): “A Price Competition Experiment Between Middleman: Linear Function Case” in *Developments on Experimental Economics: New Approaches to Solving Real-world Problems (Lecture*

Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.590), edited by Sobei H. Oda, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, pp. 245-250.

- * A26 Atsushi Iwasaki, Kazuhito Ogawa, Makoto Yokoo and Sobei H. Oda (2007): “Reinforcement Learning on Monopolistic Intermediary Games: Subject Experiments and Simulation” in *Agent-Based Approaches in Economics and Social Complex Systems IV*, edited by Takao Terano, Hajime Kita, Hiroshi Deguchi and Kyoichi Kijim, Springer-Verlag, pp. 131-139.
- * A27 Nariaki Nishino, Yasuyuki Okawa, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (2007): “An Experimental Analysis of Environmentally Conscious Decision-making for Sustainable Consumption” in *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, edited by Shozo Takata, Yasushi Umeda, Springer-Verlag, pp. 407-412.
第2部第7章
- * A28 野澤孝之・芳鐘冬樹・井田正明・渋井進・宮崎和光・喜多一 (2007): 「ビジネス・MOT, 会計, 公共政策系専門職大学院のカリキュラム構成 — シラバスの文書クラスタリングを用いた比較分析 —」, 『大学評価・学位研究』第5巻(第1号) 35-54頁.
- * A29 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (2007): “Evolution of indirect reciprocity in groups of various sizes and comparison with direct reciprocity” in *Journal of Theoretical Biology*, vol. 245 (no. 3), pp. 539-552.
- * A30 Mariko Yasugi, Takakazu Mori and Yoshiki Tsujii (2007): “The effective sequence of uniformities and its limit as a methodology in computable analysis” in *Annals of the Japan Association for Philosophy of Science*, vol. 15 (no. 2), pp. 99-121.
- * A31 Bram Cadsby, Yasuyo Hamaguchi, Toshiji Kawagoe, Elisabeth Maynes and Fei Song (2007): “Cross-National Gender Differences in Behavior in a Threshold Public Goods Game: Japan versus Canada” in *Journal of Economic Psychology*, vol. 28 (no. 2), pp. 242-260.
- * A32 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (2007): “Three-person game facilitates indirect reciprocity under image scoring” in *Journal of Theoretical Biology*, vol. 249 (no. 1), pp. 93-100.

- * A33 Takayuki Ito, Makoto Yokoo, Shigeo Matsubara and Atsushi Iwasaki (2007): “Implementing a strategyproof greedy-allocation combinatorial auction and extending to ascending auction” in *Systems and Computers in Japan*, vol. 38 (no. 9), pp. 44-51.
- * A34 Yasuyo Hamaguchi (2007): “The Mixed Effect of Voluntary Revelation: Evidence from Threshold Public Goods Game Experiments” in *Developments on Experimental Economics: New Approaches to Solving Real-world Problems (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.590)*, edited by Sobei H. Oda, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, pp. 163-167.
- * A35 Yoshio Iida (2007): “The effect of the Inter-group Competition in the Prisoner’s Dilemma Game” in *Developments on Experimental Economics: New Approaches to Solving Real-world Problems (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol.590)*, edited by Sobei H. Oda, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, pp. 157-162.
- A36 井寄幸平 (2007): 「被験者実験を用いた複占仲介業者の価格競争に関する研究」, 『経済科学研究』第10巻(第2号) 57-69頁.
- * A37 籾 悠一・横尾真・岩崎敦 (2007): 「摂動完全均衡に基づくマルチエージェント部分観測可能マルコフ決定過程のプラン構築」, 『電子情報通信学会論文誌』第J90-D巻(第9号) 2314-2323頁.
- * A38 Kazuhito Ogawa, Yusuke Koyama and Sobei H. Oda (2006): “A Middleman in An Ambiguous Situation: Experimental Evidence” in *Journal of Socio-Economics*, vol. 35 (no. 3), pp. 412-439.
- * A39 Fuyuki Yoshikane, Takayuki Nozawa and Keita Tsuji (2006): “Comparative analysis of co-authorship networks considering authors’ roles in collaboration: differences between the theoretical and application areas” in *68*, vol. 3 (no. 643-655), pp.
- .
- * A40 西野成昭・金子陽平・小田宗兵衛・上田完次 (2006): 「ネットワーク外部性を伴う市場における情報非対称性と購買行動」, 『情報処理学会論文誌』第47巻(第5号) 1473-1482頁.
- * A41 鈴木真介・秋山英三 (2006): 「多人数グループ内での間接的互惠性の進化: Standing 評判基準の効果」, 『情報処理学会論文誌』第47巻(第5号) 1463-1472頁.

- * A42 松谷俊宏・横尾真・岩崎敦 (2006): 「架空名義入札に頑健な組合せオークションプロトコルの提案と評価: バンドルサイズ優先プロトコル」, 『情報処理学会論文誌』第47巻 (第5号) 1406-1414頁.
- * A43 松谷俊宏・横尾真・岩崎敦 (2006): 「架空名義入札に頑健な組合せオークションプロトコルの提案と評価: バンドルサイズ優先プロトコル」, 『情報処理学会論文誌』第47巻 (第5号) 1406-1414頁.
- * A44 横尾真・Vincent Conitzer・Tuomas Sandholm・大田直樹・岩崎敦 (2006): 「架空名義入札に頑健な組合せオークションプロトコルの提案と評価: バンドルサイズ優先プロトコル」, 『情報処理学会論文誌』第47巻 (第5号) 1406-1414頁.
- * A45 伊藤孝行・横尾真・松原繁夫・岩崎敦 (2006): 「Greedyな割当て手法に基づく Strategy-proofな組合せオークションプロトコルと公開競上げ式プロトコルへの拡張」, 『電子情報通信学会論文誌 D-I』第 J89-D 巻 (第5号) 943-953頁.
- * A46 芳鐘冬樹, 井田正明・野澤孝之・宮崎和光・喜多一 (2006): 「キーワードの関連用語を考慮したシラバス検索システムの構築」, 『日本知能情報ファジィ学会誌』第18巻 (第2号) 299-309頁.

B.2.2 プロシーディング

- B1 近藤敏之・小林裕也・野澤孝之 (2009): 「相反する視覚運動変換の同時学習」 in 『第21回計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム』 pp. 293-298; presented at 『第21回計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム 講演論文集』.
- B2 野澤孝之・近藤敏之 (2009): 「相対的・過渡的なシステム—環境区分の特徴づけ」 in 『第21回計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム』 pp. 75-80; presented at 『第21回計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム 講演論文集』.
- * B3 Sobei H. Oda, Gen Masumoto and Hiroyasu Yoneda (2008): “Private Information and Inference about Inference” in *the proceedings of the AISB 2008 Symposium Logic and the Simulation of Interaction and Reasoning*, (<http://www.aisb.org.uk/convention/aisb08/proc/proceedings/09%20Logic%20and%20Simulation/12.pdf>), presented at *AISB 2008*.

- B4 Yoshio Iida and Sobei H. Oda (2008): “Does Learning Economics Affect Students’ Cooperative Mind?” in *the proceedings of Workshop on Experimental Economics, Education and Neuroeconomics* , pp. 165-175; presented at *Workshop on Experimental Economics*.
- * B5 Yuko Sakurai, Yasumasa Saito, Atsushi Iwasaki and Makoto Yokoo (2008): “Beyond quasi-linear utility: strategy/false-name-proof multi-unit auction protocols” in *the proceedings of the 2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology* , to appear, presented at *IAT-2008*.
- * B6 Yuko Sakurai, Atsushi Iwasaki and Makoto Yokoo (2008): “Keyword Auction Protocol for Dynamically Adjusting the Number of Advertisements” in *the proceedings of the 2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology* , to appear, presented at *IAT-2008*.
- * B7 Naoki Ohta, Vincent Conitzer, Atsushi Iwasaki and Makoto Yokoo (2008): “Anonymity-proof Shapley value: extending shapley value for coalitional games in open environments” in *the proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems* , pp. 927-934; presented at *AAMAS-2008*.
- * B8 Yuki Orii, Takayuki Nozawa and Toshiyuki Kondo (2008): “Web-based Intelligent Photo Browser for Flood of Personal Digital Photographs” in *the proceedings of International Workshop on Web Intelligence (IWI’08)* , pp. 127-130; presented at *IWI’08*.
- * B9 Toshiyuki Kondo, Osamu Amagi and Takayuki Nozawa (2008): “Proposal of Anticipatory Pattern Recognition for EMG Prosthetic Hand Control” in *the proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2008)* , pp. 897-902; presented at *SMC2008*.
- * B10 Toshiyuki Kondo, Daisuke Hirakawa, and Takayuki Nozawa (2008): “Sustainability and Predictability in a Lasting Human-Agent Interaction” in *Lecture Notes in Computer Science* , pp. 505-506; presented at *the Eight International Conference on Intelligent Virtual Agents (IVA08)*.
- * B11 Takayuki Nozawa and Toshiyuki Kondo (2008): “Information-theoretic characterization of relative and fluctuating system–environment distinction” in *the proceedings of Artificial Life XI* , pp. 791; presented at *ALife XI*.

- B12 小田宗兵衛 (2008): 「経済実験としてのニューロイメージング」 in 『第4回日本生体医工学会大会』 pp. 227 (抄録), 付録 CD-ROM (論文); presented at 『生体医工学』.
- B13 西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2008): 「廃棄物回収における行動主体の意思決定と社会制度に関する研究」 in 『第3回日本 LCA 学会研究発表会』 pp. 254-255; presented at 『日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集』.
- * B14 秋山英三, 吉田和男 (2008): 「エラー付き指導者ゲームにおける戦略の進化」 in 『The Proceedings of JAWS 2008』 pp. 1-8; presented at 『Joint Agent Workshop 2008』. 第2部第8章
- * B15 秋山英三, 吉田和男 (2008): 「エラー付き指導者ゲームにおける戦略の進化」 in 『The Proceedings of JAWS 2008』 pp. 1-8; presented at 『Joint Agent Workshop 2008』.
- * B16 齋藤宗香, 山口裕, 八楨博史, 秋山英三 (2008): 「国際政治・経済研究のためのシミュレーション環境 GPGSiM の開発」 in 『The Proceedings of JAWS 2008』 pp. 1-8; presented at 『Joint Agent Workshop 2008』.
- * B17 杉崎裕治, 今井ゆきこ, 秋山英三 (2008): 「友人関係ネットワークとメッセージ伝達ネットワークの構造と、その時間発展」 in 『The Proceedings of JWEIN2008』 pp. 57-64; presented at 『日本ソフトウェア科学会ネットワークが創発する知能研究会第3回ワークショップ』.
- * B18 倉内文孝, 金進英, 宇野伸宏, 石橋照久 (2008): 「ETC 統計データによる時間帯別ランプ間 OD 交通量推定」 in 『第28回交通工学研究発表会』 pp. 52-; presented at 『第28回交通工学研究発表会論文報告集』.
- 小林裕也・近藤敏之・野澤孝之 (2008): 「相反する回転変換の同時学習における試行の連続性の効果」 in 『第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2008)』 pp. 5-6; presented at 『第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集』.
- 米田宏之・野澤孝之・近藤敏之 (2008): 「バイオフィードバックを利用したエンターテインメントシステムに関する研究」 in 『HCI2008』 pp. 87-92; presented at 『ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集』.
- 阿部清明・野澤孝之・近藤敏之 (2008): 「筋電信号を利用した運動技能獲得支援システムの提案」 in 『HCI2008』 pp. 909-914; presented at 『ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集』.

野澤孝之・近藤敏之 (2008): 「可逆 Lattice Molecular Automata における自己組織化構造の安定性」 in 『第 20 回自律分散システム・シンポジウム』 pp. 187-192; presented at 『ヒューマンインタフェースシンポジウム 2008 論文集』.

- * B19 Nariaki Nishino, Yasuyuki Okawa, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (2007): “An Experimental Analysis of Environmentally Conscious Decision-making for Sustainable Consumption” in *Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, pp. 407-412; presented at *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*.
- * B20 Makoto Yokoo and Atsushi Iwasaki (2007): “Making VCG More Robust in Combinatorial Auctions via Submodular Approximation” in *the proceedings of the 22nd National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1679-1682; presented at *AAAI-2007*.
- B21 Eizo Akiyama (2007): “Wechselseitige Zusammenarbeit von Handelnden mit beschränkter Rationalität” in *Proceeding of Symposium zur Grundung einer Deutsch-Japanischen Akademie für integrative Wissenschaft, hrsg. von Daiseion-ji e.V. und der Wilhelm Gottfried Leibniz Gemeinschaft e.V., J. H. Roll Verlag*, pp. 173-192; presented at *Symposium zur Grundung einer Deutsch-Japanischen Akademie für integrative Wissenschaft, hrsg. von Daiseion-ji e.V. und der Wilhelm Gottfried Leibniz Gemeinschaft e.V., J. H. Roll Verlag*.
- B22 Yoshio Iida and Christiane Schwieren (2007): “Contributing for Myself, but Free-Riding for My Group?” in *Proceeding of The 11th Experimental Social Sciences Conference*, <http://21coe-glope.com/topics/schedule.doc>, presented at *The 11th Experimental Social Sciences Conference*.
第 2 部第 9 章
- B23 Fuyuki Yoshikane, Takayuki Nozawa, Susumu Shibui and Takefumi Suzuki (2007): “An analysis of the connection between researchers’ productivity and their co-authors’ past attributions, including the importance in collaboration networks” in *the proceedings of the 11th International Conference of the International Society for Scientometrics and Informetrics (ISSI 2007)*, pp. 173-192; presented at *ISSI 2007*.
- B24 Takayuki Nozawa (2007): “Top-down construction of reversible cellular automata with relatively stable structures” in *the Abstracts of International Symposium on*

Dynamical Systems Theory and its Application to Biology and Environmental Science , pp. 67; presented at *International Symposium on Dynamical Systems Theory and its Application to Biology and Environmental Science*.

- * B25 井寄幸平・小川一仁・小田宗兵衛 (2007): 「被験者実験とエージェントシミュレーションによる意思決定過程の分析」 in 『JAWS 2007』, (USB メモりに収録 6pages); presented at 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2007 論文集』.
- * B26 西野成昭・大川泰幸・小田宗兵衛・上田完次 (2007): 「マルチエージェントシミュレーションと被験者実験を用いた資源消費における環境配慮行動の分析」 in 『JAWS 2007』, (USB メモりに収録 8pages); presented at 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2007 論文集』.
- B27 西野成昭・金子陽平・小田宗兵衛・上田完次 (2007): 「マルチエージェントモデルを用いたネットワーク外部性市場における製品普及の分析」 in 『日本応用数学会 2007 年度年会』 pp. 318-319; presented at 『日本応用数学会 2007 年度会講演予稿集』.
- B28 金子陽平・西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2007): 「ネットワーク外部性市場における不完全情報下での新製品導入に関する意思決定：マルチエージェントシミュレーションと被験者実験」 in 『2007 年度人工知能学会全国大会』, (Paper No.2C4-5); presented at 『2007 年度人工知能学会全国大会 (第 21 回) 論文集』.
- 近藤敏之・野澤孝之・小林裕也 (2007): 「相反する運動技能の同時学習と環境文脈による選択」 in 『SI2007』 pp. 59-62; presented at 『計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2007 論文集』.
- 野澤孝之・近藤敏之 (2007): 「可動性を備えた自己組織化構造を実現する可逆 CA の構築」 in 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2007 (JAWS2007)』 pp. 8; presented at 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2007 (USB メモりに収録)』.
- 野澤孝之・渋井進・芳鐘冬樹・井田正明・宮崎和光・喜多一 (2007): 「シラバス内の専門用語間の関連に基づくカリキュラム構造可視化手法の検討」 in 『情報処理学会 第 69 回全国大会』 pp. 199-300; presented at 『情報処理学会 第 69 回全国大会講演論文集 Vol.4』.
- 野澤孝之・渋井進 (2007): 「共著相手の特性が研究者の論文生産性に及ぼす影響に関する分析」 in 『第 54 回日本図書館情報学会研究大会』 pp. 113-116; presented at 『第 54 回日本図書館情報学会研究大会発表要綱』.

- * B29 Yohei Kaneko, Nariaki Nishino, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (2006): “Analysis of Purchase Decision Making: Network Externalities and Asymmetric Information” in *Intelligent Autonomous Systems 9* , pp. 515-522; presented at *IAS-9*.
- * B30 Yohei Kaneko, Nariaki Nishino, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (2006): “Economic Behavior in a Market with Network Externalities: An Analysis on Decision-making under Incomplete Information” in *Proceedings of IAREP-SABE Conference* , P083 (CD-ROM), presented at *IAREP-SABE Conference*.
- * B31 Nariaki Nishino, Yasuyuki Okawa, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (2006): “Does Self-Interested Behavior Stop Before Exhausting Environmental Resources? Experiments and Simulation with Long-term Common-pool Resource Game” in *Proceedings of IAREP-SABE Conference* , P015 (CD-ROM), presented at *IAREP-SABE Conference*.
- * B32 Nariaki Nishino, Hiroki Nakayama, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (2006): “The Role of An Independent Recycling Dealer in Durable Goods Recycling: An Analysis with Simulation and Economic Experiments” in *Proceedings of 6th International Workshop on Emergent Synthesis* , 53-61, presented at *IWES06*.
- * B33 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (2006): “Evolution of compassion under un-repeated interaction” in *the Proceedings of the First World Congress on Social Simulation* , pp. 65-72; presented at *WCSS2006*.
- * B34 Makoto Yokoo, Toshihiro Matsutani and Atsushi Iwasaki (2006): “False-name-proof Combinatorial Auction Protocol: Groves Mechanism with Submodular Approximation” in *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems* , pp. 1135-1142; presented at *AAMAS-2006*.
- * B35 Naoki Ohta, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo, Kohki Maruono, Vincent Conitzer and Tuomas Sandholm (2006): “A Compact Representation Scheme for Coalitional Games in Open Anonymous Environments” in *Proc. of Twenty-first National Conference on Artificial Intelligence* , pp. 509-514; presented at *AAAI-2006*.
- * B36 Hiromichi Kimura and Eizo Akiyama (2006): “Grand Canonical Minority Game with Variable Strategy Spaces” in *Proceeding of the 19th Annual Conferences of the Japanese Society for Artificial Intelligence* , pp. 291-301; presented at *Annual Conferences of the Japanese Society for Artificial Intelligence*.

- B37 金子陽平・西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2006): 「被験者実験を用いた不完全情報下の意思決定によるイノベーション普及の分析」 in 『第2回国際シンポジウム日本の技術革新－経験蓄積と知識基盤化－』 pp. 61-62; presented at 『第2回国際シンポジウム日本の技術革新－経験蓄積と知識基盤化－研究論文発表会論文集』 .
- B38 金子陽平・西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2006): 「ネットワーク外部性を伴う市場における新製品導入の意思決定に関する研究」 in 『日本機械学会第16回インテリジェント・システム・シンポジウム』 pp. 49-50; presented at 『日本機械学会第16回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集』 .
- * B39 杉崎裕治, 秋山英三 (2006): 「友人ネットワーク形成における2者間と3者間の関係の構造化の違い」 in 『The Proceedings of JWEIN2006』 pp. 97-104; presented at 『日本ソフトウェア科学会ネットワークが創発する知能研究会第2回ワークショップ』 .
- * B40 木村博道, 秋山英三 (2006): 「日本の株式市場におけるゼロインテリジェンスモデルの説明力」 in 『The Proceedings of JAWS 2006』 pp. 1-8; presented at 『Joint Agent Workshop 2006』 .
- B41 鈴木真介, 秋山英三 (2006): 「Dynamics of indirect reciprocity in three-person game」 in 『数理モデル化と問題解決シンポジウム (複雑系の科学とその応用) 論文集』 pp. 209-216; presented at 『数理モデル化と問題解決シンポジウム』 .
- B42 木村博道, 秋山英三 (2006): 「流動性指標に見るトレーダーの行動」 in 『数理モデル化と問題解決シンポジウム (複雑系の科学とその応用) 論文集』 pp. 209-216; presented at 『数理モデル化と問題解決シンポジウム』 .
- B43 野澤孝之 (2006): 「可逆セルラ・オートマタにおける部分パターン安定性の定義について」 in 『電子情報通信学会 非線形問題研究会 (NLP) 2006-06』 pp. 35-40; presented at 『信学技報, Vol.106 (no. 126)』 .

B.2.3 その他

- C1 Eizo Akiyama, Ryuichiro Ishikawa, Yohei Kaneko and Jeffrey J. Kline (2008): “A Simulation Study of Learning a Structure: Mike’s Bike Commuting ” in *Economic Theory*, pp. 29.
- C2 八杉満利子 (一部執筆) (2008): 「解析学の計算可能版」 『数学セミナー 2008 5 特集 この数学はおもしろい!』, 日本評論社, 30-31 頁.

- C3 八杉満利子 (一部執筆) (2008): 「ゲーデルの不完全性定理 それは何であるか、何でないか」『数理科学 2008年11月号』, サイエンス社, 54-55頁.
- C4 小田宗兵衛 (2008): 「読書感想文から書評へ: 書評委員の期待すること」, 『Lib.: 京都産業大学図書館報』第35巻 (第増刊号) 34-35頁.
- C5 Yasuyo Hamaguchi, Ryuichiro Ishikawa, Masayuki Ishimoto, Hiromichi Kimura and Tadanobu Tanno (2006): “An Experimental Study of Procurement Auctions with Leniency Programs ” as *Competition Policy Research Center Discussion Papers* no. 24-E.
- C6 小田宗兵衛 (2006): 「経済学教育における実験 (ゲーム) の利用」, 京都産業大学FD推進委員会 (編) 『授業改善のヒント-京都産業大学の試み-』, 京都産業大学教育エクセレンス支援センター, 78-82頁.
http://www.kyoto-su.ac.jp/outline/excellence/pdf/2007_kaiizen.pdf
- C7 丹野忠晋・濱口泰代・木村友二・石本将之・鈴木淑子 (2006): 「リーニエンシー制度の経済分析」『公正取引委員会競争政策研究センター・共同研究報告書』, no. CR03-06.
- C8 小田宗兵衛 (2006): 「経済学教育における実験 (ゲーム) の利用」, 京都産業大学FD推進委員会 (編) 『授業改善のヒント-京都産業大学の試み-』, 京都産業大学教育エクセレンス支援センター, 78-82頁.
- C9 秋山英三 (一部執筆) (2006): 「どうすれば協力的な社会が作れるか 社会工学が面白い - 学際学問への招待」『筑波大学社会工学類編』, 開成出版, 45-52頁.
- C10 岩崎敦 (項目執筆) (2006): 「メカニズムデザイン」『進化経済学ハンドブック』, 共立出版, 581頁.

B.3 報告

B.3.1 国内学会

- D1 野澤孝之・近藤敏之 (2009年1月22-23日): 「相対的・過渡的なシステム—環境区分の特徴づけ」, 『第21回計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム』鳥取とりぎん文化会館.

- D2 西村直史・大田直樹・櫻井祐子・岩崎敦・横尾真 (2008年10月29-31日): 「制約充足／最適化テクニックを用いた会議プログラム自動生成ツールの開発」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2008 (JAWS-2008)』 大津プリンスホテル.
- D3 東藤大樹・岩崎敦・横尾真・櫻井祐子 (2008年10月29-31日): 「組合せオークションのための架空名義操作不可能なメカニズムの特性」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2008 (JAWS-2008)』 大津プリンスホテル.
- D4 佐藤恭史・大田直樹・櫻井祐子・岩崎敦・横尾真 (2008年10月29-31日): 「クラーク税を用いた戦略的操作不可能な費用分担メカニズムの提案」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2008 (JAWS-2008)』 大津プリンスホテル.
- D5 斎藤恭昌・櫻井祐子・岩崎敦・横尾真 (2008年10月29-31日): 「Take-It-or-Leave-Itに基づく再配分オークションメカニズムの提案」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2008 (JAWS-2008)』 大津プリンスホテル.
- D6 櫻井祐子・鈴木幸太郎・横尾真・岩崎敦 (2008年10月29-31日): 「セキュアキーワード広告オークションプロトコルの提案」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2008 (JAWS-2008)』 大津プリンスホテル.
- D7 大森由総・斎藤恭昌・岩崎敦・櫻井祐子・横尾真 (2008年10月29-31日): 「自動メカニズムデザインによる架空名義入札に頑健な組合せオークションメカニズムの構築」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2008 (JAWS-2008)』 大津プリンスホテル.
- D8 秋山英三・吉田和男 (2008年10月29-31日): 「エラー付き指導者ゲームにおける戦略の進化」, 『Joint Agent Workshop (JAWS 2008)』 大津プリンスホテル.
- D9 大森由総・斎藤恭昌・岩崎敦・横尾真 (2008年9月2-4日): 「自動メカニズムデザインによる架空名義入札に頑健な組合せオークションメカニズムの構築」, 『第7回情報科学技術フォーラム (FIT-2008)』 慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス.
- D10 大田直樹・佐藤恭史・岩崎敦・横尾真・Vincent Conitzer (2008年6月11-13日): 「匿名操作不可能シャプレイ値: 開環境での協力ゲームにおける効率的に表記／求解可能な解概念」, 『第22回人工知能学会全国大会』 ときわ市民ホール (旭川市).
- D11 大森由総・斎藤恭昌・岩崎敦・横尾真 (2008年6月11-13日): 「自動メカニズムデザインによる架空名義入札に頑健な組合せオークションメカニズムの構築」, 『第22回人工知能学会全国大会』 ときわ市民ホール (旭川市).

- D12 櫻井祐子・斎藤恭昌・岩崎敦・横尾真 (2008年6月11-13): 「予算制約を考慮した架空名義入札に頑健なオークションプロトコルの提案」, 『第22回人工知能学会全国大会』ときわ市民ホール (旭川市) .
- D13 西村直史・徳永亮・櫻井祐子・大田直樹・岩崎敦・横尾真 (2008年6月11-13日): 「人工知能学会全国大会プログラム自動作成ツールの開発」, 『第22回人工知能学会全国大会』ときわ市民ホール (旭川市) .
- D14 小田宗兵衛 (2008年5月8-10日): 「経済実験としてのニューロイメージング」, 『第4回日本生体医工学会大会』神戸国際会議場.
- D15 秋山英三 (2008年3月27-28日): 「構成員の能力の非均一性と社会的効率」, 『人工知能学会知識ベースシステム研究会第81回研究会発表会 (知能・適応と社会、ネットワーク)』筑波大学 (茗荷谷キャンパス) .
- D16 大田直樹・佐藤恭史・岩崎敦・横尾真・Vincent Conitzer (2008年3月25-26日): 「匿名の開環境における協力ゲームについて」, 『日本オペレーションズ・リサーチ学会2008年春季研究発表会』京都情報大学院大学.
- D17 灰谷綾平・小田宗兵衛 (2008年3月23日): 「経済実験の教育効果: 学生が学ぶことと学ばないこと」, 『第12回進化経済学会』鹿児島国際大学.
- D18 鈴木真介・藤崎祥見・秋山英三・仁木和久 (2008年3月6-8日): 「Neural Basis of Social Cooperation with Reputations」, 『京都ゲーム理論ワークショップ2008』京都大学.
- D19 八杉満利子 (2008年3月4-5日): 「不連続関数の計算可能性の手法: 極限再帰関数と実効的一様位相」, 『科研費 (萌芽)・京都産業大学総合研究支援による研究集会・極限再帰関数による計算と学習理論および関連トピックス』京都大学文学研究科.
- D20 西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2008年2月28-3月1日): 「廃棄物回収における行動主体の意思決定と社会制度に関する研究」, 『第3回日本LCA学会研究発表会』名古屋大学.
- D21 西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2008年2月28-3月1日): 「廃棄物回収における行動主体の意思決定と社会制度に関する研究」, 『第3回日本LCA学会研究発表会』名古屋大学.

- D22 野澤孝之・近藤 敏之 (2008年1月24-25日): 「可逆 Lattice Molecular Automata における自己組織化構造の安定性」, 『第20回自律分散システム・シンポジウム』信州上諏訪温泉 浜の湯.
- D23 灰谷綾平・小田宗兵衛 (2007年12月9日): 「経済実験の教育効果-学生が学ぶことと学ばないこと」, 『経済教育学会2007年度大会』福岡教育大学.
- D24 鈴木真介・秋山英三 (2007年12月8-9日): 「 n 人ゲームにおける互惠的協力行動の進化ダイナミクス」, 『人間行動進化学研究会第9回研究発表会』総合研究大学院大学.
- D25 鈴木真介・秋山英三 (2007年10月29-11月2日): 「 n 人ゲームにおける間接互惠性の周期的・カオスのダイナミクス」, 『生物数学の理論とその応用』京都大学.
- D26 井寄幸平・小川一仁・小田宗兵衛 (2007年10月29-31日): 「被験者実験とエージェントシミュレーションによる意思決定過程の分析」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2007 (JAWS 2007)』沖縄コンベンションセンター.
- D27 大田直樹・佐藤恭史・横尾真・岩崎敦・Vincent Conitzer (2007年10月29-31日): 「匿名操作不可能シャプレイ値:開環境での協力ゲームにおける効率的に表記/求解可能な解概念」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2007 (JAWS-2007)』沖縄コンベンションセンター.
- D28 徳永亮・大田直樹・岩崎敦・櫻井祐子・横尾真 (2007年10月29-31日): 「人間を模倣した数独解法アルゴリズムの提案と評価」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2007 (JAWS-2007)』沖縄コンベンションセンター.
- D29 斎藤恭昌・岩崎敦・横尾真・David Kempe・Mahyar Salek (2007年10月29-31日): 「チーム選択問題のための架空名義操作不可能なオークションメカニズムの提案」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2007 (JAWS-2007)』沖縄コンベンションセンター.
- D30 櫻井祐子・岩崎敦・横尾真 (2007年10月29-31日): 「適切な掲載数を決定するキーワード広告オークションの提案」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2007 (JAWS-2007)』沖縄コンベンションセンター.
- D31 田崎誠・藪悠一・横尾真・岩崎敦 (2007年10月29-31日): 「マルチエージェント部分観測可能マルコフ過程のプラン構築への通信の導入」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2007 (JAWS-2007)』沖縄コンベンションセンター.

- D32 西野成昭・大川泰幸・小田宗兵衛・上田完次 (2007年10月29-31日): 「マルチエージェントシミュレーションと被験者実験を用いた資源消費における環境配慮行動の分析」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2007 (JAWS2007)』沖縄コンベンションセンター.
- D33 灰谷綾平・小田宗兵衛 (2007年9月23日): 「経済実験を用いた経済学教育-実験参加者が実験から学ぶことと学ばないこと」, 『日本教育工学会 第23回全国大会』早稲田大学.
- D34 西野成昭・金子陽平・小田宗兵衛・上田完次 (2007年9月15-17日): 「マルチエージェントモデルを用いたネットワーク外部性市場における製品普及の分析」, 『日本応用数理学会2007年度年会』北海道大学.
- D35 田崎誠・藪悠一・横尾真・岩崎敦 (2007年9月5-7日): 「不確実な状況下における協調プラン探索法への通信の導入」, 『第6回情報科学技術フォーラム (FIT-2007)』中京大学 (豊田市).
- D36 櫻井祐子・井上博文・岩崎敦・横尾真 (2007年6月20-22日): 「掲載数を最適化するキーワード広告オークションの提案」, 『第21回人工知能学会全国大会』ワールドコンベンションセンターサミット (宮崎市).
- D37 佐藤恭史・大田直樹・横尾真・岩崎敦 (2007年6月20-22日): 「開環境での協力ゲームにおける解の簡略表記法の評価と算出方法の提案」, 『第21回人工知能学会全国大会』ワールドコンベンションセンターサミット (宮崎市).
- D38 斎藤恭昌・岩崎敦・横尾真・David Kempe・Mahyar Salek (2007年6月20-22日): 「架空名義操作不可能な経路選択オークションメカニズムの提案」, 『第21回人工知能学会全国大会』ワールドコンベンションセンターサミット (宮崎市).
- D39 黒田直樹・横尾真・岩崎敦 (2007年6月20-22日): 「株取引シミュレータの開発と自動取引戦略の開発」, 『第21回人工知能学会全国大会』ワールドコンベンションセンターサミット (宮崎市).
- D40 金子陽平・西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2007年6月18-22日): 「ネットワーク外部性市場における不完全情報下での新製品導入に関する意思決定: マルチエージェントシミュレーションと被験者実験」, 『2007年度人工知能学会全国大会』ワールドコンベンションサミット (宮崎).

- D41 灰谷綾平・小田宗兵衛 (2007年6月2日): 「What Students Learn from Market Experiments and What They Don't」, 『日本経済学会 2007年春季大会』大阪学院大学.
- D42 秋山英三 (2007年3月29-30日): 「動的資源を巡る行動同期の機構と協カールールの形成」, 『人工知能学会 知識ベースシステム研究会第77回研究会発表会(知能・適応と社会、ネットワーク)』筑波大学(茗荷谷キャンパス).
- D43 秋山英三 (2007年3月27日): 「ゲームと時間」, 『シンポジウム「社会シミュレーションの可能性」』東京工業大学(大岡山キャンパス).
- D44 川村哲也・舂本 現・小林洋平 (2007年3月24-25日): 「合理的行動からの自生的コミットメント関係の成立」, 『第11回進化経済学会』京都大学百周年時計台記念館国際交流ホール.
- D45 小川一仁・川村哲也・菊谷達弥・小田宗兵衛 (2007年3月24-25日): 「多市場接触実験において相互協力を達成しうる戦略について: 行動分析による分析」, 『第11回進化経済学会』京都大学.
- D46 野澤孝之 (2007年10月29-31日): 「可動性を備えた自己組織化構造を実現する可逆CAの構築」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム2007(JAWS2007)』沖縄コンベンションセンター.
- D47 野澤孝之・渋井進・芳鐘冬樹・井田正明・宮崎和光・喜多一 (2007年3月6-8日): 「シラバス内の専門用語間の関連に基づくカリキュラム構造可視化手法の検討」, 『情報処理学会第69回全国大会』早稲田大学理工学部.
- D48 金子陽平・西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2006年12月15-16日): 「被験者実験を用いた不完全情報下の意思決定によるイノベーション普及の分析」, 『第2回国際シンポジウム日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化—』国立科学博物館新宿分館.
- D49 小林洋平・舂本 現・川村哲也 (2006年12月14-16日): 「エージェント間のグループ形成とコミットメント変化」, 『第7回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会』札幌コンベンションセンター, 北海道.
第2部第10章
- D50 鈴木真介・秋山英三 (2006年12月2-3日): 「Evolutionary stability of indirect reciprocity in sizable groups」, 『人間行動進化学研究会第8回研究発表会』東京大学.

- D51 灰谷綾平・小田宗兵衛 (2006年12月2日): 「経済実験の教育効果: 実験参加者が実験から学ぶことと学ばないこと」, 『第10回実験経済学コンファレンス』東京大学.
- D52 木村博道・秋山英三 (2006年10月25-27日): 「日本の株式市場におけるゼロインテリジェンスモデルの説明力」, 『The Proceedings of the Joint Agent Workshop 2006 (JAWS 2006)』鈴鹿サーキットフラワーガーデンホテル, 三重県.
- D53 岩崎敦・横尾真・松原繁夫・伊藤孝行 (2006年10月25-27日): 「インターネット上の不正行為に頑健な取引メカニズム: サーベイ」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2006 (JAWS 2006)』鈴鹿サーキットホテル, 三重県.
- D54 岩崎敦・小田宗兵衛・横尾真 (2006年10月25-27日): 「閾値付き公共財供給における強化学習の記述力の検証: 計算機実験と被験者実験の比較」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2006 (JAWS 2006)』鈴鹿サーキットホテル, 三重県.
- D55 大田直樹・岩崎敦・横尾真・Vincent Conitzer・Tuomas Sandholm (2006年10月25-27日): 「開環境での協力ゲームにおける解の簡略記述法の検討」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2006 (JAWS 2006)』鈴鹿サーキットホテル, 三重県.
- D56 籾悠一・横尾真・岩崎敦 (2006年10月25-27日): 「摂動完全均衡に基づくマルチエージェント部分観測可能マルコフ決定過程のプラン構築」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2006 (JAWS 2006)』鈴鹿サーキットホテル, 三重県.
- D57 鈴木真介・秋山英三 (2006年10月24-25日): 「多人数グループ内での間接的互惠性の進化ダイナミクス」, 『数理モデル化と問題解決シンポジウム (複雑系の科学とその応用)』名古屋大学.
- D58 木村博道・秋山英三 (2006年10月24-25日): 「流動性指標に見るトレーダーの行動」, 『数理モデル化と問題解決シンポジウム (複雑系の科学とその応用)』名古屋大学.
- D59 杉崎裕治・秋山英三 (2006年9月27-29日): 「友人ネットワーク形成における2者間と3者間の関係の構造化の違い」, 『日本ソフトウェア科学会ネットワークが創発する知能研究会 第2回ワークショップ (JWEIN2006)』ニュー阿寒ホテル (北海道阿寒郡阿寒町阿寒湖温泉).

- D60 金子陽平・西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2006年9月26-27日): 「ネットワーク外部性を伴う市場における新製品導入の意思決定に関する研究」, 『日本機械学会第16回インテリジェント・システム・シンポジウム』東京大学柏キャンパス.
- D61 木村博道・秋山英三 (2006年9月21-22日): 「日本の株式市場における、ゼロインテリジェンスモデルの検証」, 『経済物理とその周辺 2006年度第1回研究会』統計数理研究所.
- D62 籾悠一・横尾真・岩崎敦 (2006年6月7-9日): 「摂動完全均衡に基づくマルチエージェント部分観測可能マルコフ過程のプラン構築」, 『第20回人工知能学会全国大会』タワーホール船堀, 東京都.
- D63 大田直樹・丸小野公己・岩崎敦・横尾真 (2006年 6月7-9日): 「開環境での協力ゲームにおける解の簡略記述法の検討」, 『第20回人工知能学会全国大会』タワーホール船堀, 東京都.
- D64 黒田直樹・横尾真・岩崎敦 (2006年 6月7-9日): 「ElGamal暗号を用いた Secure DisCSP アルゴリズムの実装と評価」, 『第20回人工知能学会全国大会』タワーホール船堀, 東京都.
- D65 鈴木真介・秋山英三 (2006年3月29-30日): 「多人数ゲームにおける間接互惠性の進化: 4人ゲームの例」, 『人工知能学会知識ベースシステム研究会第77回研究会発表会(知能・適応と社会、ネットワーク)』筑波大学(茗荷谷キャンパス).
- D66 八杉満利子・森隆一・辻井芳樹 (2006年3月26-29日): 「Sequential computability of a function - effective Fine space and limiting recursion-」, 『日本数学会年会』数学基礎論・歴史分科会.
- D67 野澤孝之 (2006年6月23日): 「可逆セルラ・オートマタにおける部分パターン安定性の定義について」, 『電子情報通信学会 非線形問題研究会(NLP) 2006-06』中央大学後楽園キャンパス.

B.3.2 国際学会

- E1 Yuko Sakurai, Yasumasa Saito, Atsushi Iwasaki and Makoto Yokoo (9-12 December 2008): “Beyond quasi-linear utility: strategy/false-name-proof multi-unit auction protocols” presented at *2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT-2008)*, Sydney, Australia.

- E2 Yuko Sakurai, Atsushi Iwasaki and Makoto Yokoo (9-12 December 2008): “Keyword Auction Protocol for Dynamically Adjusting the Number of Advertisements” presented at *2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT-2008)*, Sydney, Australia.
- E3 Eizo Akiyama (5-7 December 2008): “Evolution of Strategies in Noisy Leader Game” presented at *The 7th International Conference on Computational Intelligence in Economics and Finance*, Kainan University, Taoyuan, Taiwan.
- E4 Jinyoung Kim, Fumitaka Kurauchi and Nobuhiro Uno (16-20 November 2008): “Analysis of Road Performance and Traffic Demand Variations by the Seasons” presented at *The 15th World Congress on Intelligent Transport Systems*, NY, USA.
- E5 Takakazu Mori, Mariko Yasugi and Yoshiki Tsujii (23 August 2008): “Integral of two-dimensional Fine-computable functions” presented at *Fifth International Conference on Computability and Complexity in Analysis (CCA2008)*, Arcadion, Hagen, Germany.
- E6 Yoshio Iida and Sobei H. Oda (17-19 July 2008): “Does learning economics affect students’ cooperative mind?” presented at *The International Conference on Education, Economy and Society*, Novotel Paris tour Eiffel, Paris, France.
- E7 Ryohei Haitani and Sobei H. Oda (17-19 July 2008): “What Students Learn from Market Experiments and What They Don’t” presented at *The Paris International Conference on Education, Economy and Society*, Novotel Paris tour Eiffel, Paris, France.
- E8 Ryohei Haitani and Sobei H. Oda (25-29 June 2008): “What Students Learn from Market Experiments and What They Don’t” presented at *The 15th World Congress of the International Economic Association*, Istanbul Convention and Exhibition Center (ICEC), Istanbul, Turkey.
- E9 Hiroyasu Yoneda and Sobei H. Oda (25-29 June 2008): “Towards an Understanding of Choice Under Uncertainty and Intertemporal Preference Within a Unified Framework: An fMRI Study of Risky and Intertemporal Decision-making” presented at *The 15th World Congress of the International Economic Association*, Istanbul Convention and Exhibition Center (ICEC), Istanbul, Turkey.

- E10 Mariko Yasugi (26-30 May 2008): “Effective uniformity and limiting recursion in computable analysis” presented at *Workshop on Constructivism : Logic and Mathematics*, Kanazawa Bunka Hall, Kanazawa, Japan.
- E11 Naoki Ohta, Vincent Conitzer, Yasufumi Satoh, Atsushi Iwasaki and Makoto Yokoo (12-16 May 2008): “Anonymity-proof Shapley value: extending shapley value for coalitional games in open environments” presented at *7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2008)*, Estoril, Portugal.
- E12 Sobei H. Oda, Gen Masumoto and Hiroyasu Yoneda (3-4 April 2008): “Private Information and Inference about Inference” presented at *AISB 2008 Symposium Logic and the Simulation of Interaction and Reasoning*, University of Aberdeen, Aberdeen, U.K..
- E13 Hiroyasu Yoneda and Sobei H. Oda (27-29 March 2008): “Towards an Understanding of Choice under Uncertainty and Intertemporal Preference Within a Unified Framework: An fMRI Study of Risky and Intertemporal Decision-making” presented at *The Fourth International Meeting on Experimental and Behavioural Economics (IMEBE 2008)*, University of Alicante, Alicante, Spain.
- E14 Nobuyuki Hanaki, Ishikawa Ryuichiro and Eizo Akiyama (13-15 March 2008): “Learning Games” presented at *The Third International Nonlinear Sciences Conference*, Tokyo, Japan.
- E15 Hiroyasu Yoneda (16-17 February 2008): “fMRI Experiments on Intertemporal Preference and Decision-making Under Uncertainty” presented at *Workshop on Experimental Economics, Economics Education and Neuroeconomics: Understanding Economic Behavior: Observer’s Description, Participants; Introspection and Brain Activities*, Kyoto Sangyo University, Kyoto, Japan.
- E16 Sobei H. Oda (16-17 February 2008): “Opening Address: Viewpoints for Understanding Human Behaviour and Economic Systems” presented at *Workshop on Experimental Economics, Economics Education and Neuroeconomics: Understanding Economic Behavior: Observer’s Description, Participants’ Introspection and Brain Activities*, Kyoto Sangyo University, Kyoto, Japan.
- E17 Hiroyasu Yoneda and Sobei H. Oda (16-17 February 2008): “fMRI Experiments on Intertemporal Preference and Decision-making Under Uncertainty” presented at

Workshop on Experimental Economics, Economics Education and Neuroeconomics: Understanding Economic Behavior: Observer's Description, Participants' Introspection and Brain Activities, Kyoto Sangyo University, Kyoto, Japan.

- E18 Yoshio Iida and Sobei H. Oda (16-17 February 2008): “Does Learning Economics Affect Students’ Cooperative Mind?” presented at *Workshop on Experimental Economics, Economics Education and Neuroeconomics*, Kyoto Sangyo University, Kyoto, Japan.
- E19 Takayuki Nozawa and Toshiyuki Kondo (5-8 August 2008): “Information-theoretic characterization of relative and fluctuating system–environment distinction” presented at *Artificial Life XI*, , Winchester, UK..
- E20 Atsushi Iwasaki, David Kempe, Yasumasa Saito, Mahyar Salek and Makoto Yokoo (12-14 December 2007): “False-Name-Proof Mechanisms for Hiring a Team” presented at *3rd International Workshop On Internet And Network Economics (WINE-2007)*, San Diego, USA.
第2部第11章
- E21 Yoshiki Tsujii, Takakazu Mori, Mariko Yasugi and Hideki Tsuiki (3-5 November 2007): “Fractals defined by infinite contributions and mutual-recursive sets” presented at *International Conference on Infinity in Logic and Computation*, University of Cape Town, Cape Town, South Africa.
- E22 Yoshio Iida and Christiane Schwierén (27 October 2007): “Contributing for Myself, but Free-Riding for My Group?” presented at *The 11th Experimental Social Sciences Conference in Japan*, Waseda University, Tokyo, Japan.
- E23 Makoto Yokoo and Atsushi Iwasaki (22-26 July 2007): “Making VCG More Robust in Combinatorial Auctions via Submodular Approximation” presented at *22nd National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2007)*, Vancouver, Canada.
- E24 Ryohei Haitani and Sobei H. Oda (12 July 2007): “What Students Learn from Market Experiments and What They Don’t” presented at *The 38th Conference International Simulation and Gaming Association*, Nijmegen, The Netherlands.
- E25 Takakazu Mori, Yoshiki Tsujii and Mariko Yasugi (16-18 June 2007): “Integral of Fine computable functions and Walsh Fourier series” presented at *Fourth International Conference on Computability and Complexity in Analysis*, Siena, Italy.

- E26 Nariaki Nishino, Yasuyuki Okawa, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (11-13 June 2007): “An Experimental Analysis of Environmentally Conscious Decision-making for Sustainable Consumption” presented at *14th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Waseda University, Japan.
- E27 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (30 May-3 June 2007): “Chaos and oscillation in the evolution of indirect reciprocity in n-person games” presented at *The 19th Annual Meeting of the Human Behavior and Evolution Society*, the College of William and Mary in Williamsburg, Virginia, USA.
- E28 Ryohei Haitani and Sobei H. Oda (22 March 2007): “What Students Learn from Market Experiments and What They Don’t” presented at *The 3rd International Meeting on Experimental and Behavioural Economics*, University of Maraga, Maraga, Spain.
- E29 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (14-17 March 2007): “Evolutionary Phenomena of Indirect Reciprocity in n-Person Game” presented at *2nd International Symposium on Dynamical Systems Theory and Its Applications to Biology and Environmental Sciences*, Shizuoka University, Shizuoka, Japan.
- E30 Eizo Akiyama (5 March 2007): “Dynamical Systems Game and Dynamics of Games” presented at *Japanese-German Workshop on Evolutionary Economics*, Max Planck Institute of Economics, Jena, Germany.
- E31 Yasuyo Hamaguchi, Toshiko Ishikawa, Masayuki Ishimoto, Yuji Kimura and Tadanobu Tanno (11 February 2007): “An Experimental Study of Procurement Auctions with Leniency Programs” presented at *Asia-Pacific Regional Meeting of Economic Science Association*, Osaka University, Osaka, Japan.
- E32 Ryohei Haitani and Sobei H. Oda (11 February 2007): “What Students Learn from Market Experiments and What They Don’t” presented at *The 2nd Asia-Pacific Meeting on the Economic Science Association of Japan*, Osaka University, Osaka, Japan.
- E33 Takayuki Nozawa and Toshiyuki Kondo (10-12 December 2007): “Lattice Molecular Automata with Reversibility” presented at *2nd International Workshop on Natural Computing*, Nagoya Univ., Nagoya, Japan.

- E34 Takayuki Nozawa (14-17 March 2007): “Top-down construction of reversible cellular automata with relatively stable structures” presented at *International Symposium on Dynamical Systems Theory and its Application to Biology and Environmental Science*, Shizuoka Univ., Hamamatsu, Japan.
- E35 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (23-25 November 2006): “Dynamics of indirect reciprocity in sizable groups” presented at *Econophysics Colloquium 2006*, International Christian University, Tokyo, Japan.
- E36 Hiromichi Kimura and Eizo Akiyama (23-25 November 2006): “Asymmetric zero intelligence model in the Japanese stock market” presented at *Econophysics Colloquium 2006*, International Christian University, Tokyo, Japan.
- E37 Kazuhito Ogawa, Tetsuya Kawamura, Tatsuya Kikutani and Sobei H. Oda (12-15 November 2006): “Difficulty of cooperation in iterated multi-Prisoner’s Dilemma situation-Experimental evidence-” presented at *International workshop on Computational Intelligence in Economics and Finance*, Kaohsiung, Taiwan.
- E38 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (21-25 August 2006): “Evolution of compassion under un-repeated interaction” presented at *First World Congress on Social Simulation (WCSS2006)*, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- E39 Shinsuke Suzuki and Eizo Akiyama (18-20 August 2006): “Relation between indirect and direct reciprocity” presented at *The 2nd Asian Decentralization Conference*, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan.
- E40 Eizo Akiyama (18-20 August 2006): “Tutorial : Social Science and Computer Simulation” presented at *The 2nd Asian Decentralization Conference*, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan.
- E41 Nariaki Nishino, Hiroki Nakayama, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (18-19 August 2006): “The Role of An Independent Recycling Dealer in Durable Goods Recycling: An Analysis with Simulation and Economic Experiments” presented at *6th International Workshop on Emergent Synthesis (IWES06)*, The University of Tokyo, Japan.
- E42 Naoki Ohta, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo, Koki Maruono, Vincent Conitzer and Tuomas Sandholm (16-20 July 2006): “A Compact Representation Scheme

- for Coalitional Games in Open Anonymous Environments” presented at *21st National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2006)*, Boston, Massachusetts, USA.
- E43 Yohei Kaneko, Nariaki Nishino, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (5-8 July 2006): “Economic Behavior in a Market with Network Externalities: An Analysis on Decision-making under Incomplete Information” presented at *IAREP-SABE Conference*, Universities of Paris 1 and Paris 5, France.
- E44 Nariaki Nishino, Yasuyuki Okawa, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (5-8 July 2006): “Does Self-Interested Behavior Stop Before Exhausting Environmental Resources?” presented at *IAREP-SABE Conference*, Universities of Paris 1 and Paris 5, France.
- E45 Christiane Schwioren and Yoshio Iida (22-24 June 2006): “Contributing For Myself, But Free-riding For My Group” presented at *12th International Conference on the Foundations and Applications of Utility, Risk and Decision Theory*, Faculty of Economics of the Libera Universita degli Studi Sociali in Viale Pola, Rome, Italy.
- E46 Makoto Yokoo, Toshihiro Matsutani and Atsushi Iwasaki (8-12 May 2006): “False-name-proof Combinatorial Auction Protocol: Groves Mechanism with Submodular Approximation” presented at *5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2006)*, Hakodate, Japan.
- E47 Yohei Kaneko, Nariaki Nishino, Sobei H. Oda and Kanji Ueda (7-9 March 2006): “Analysis of Purchase Decision Making : Network Externalities and Asymmetric Information” presented at *Intelligent Autonomous Systems 9*, Kashiwa, Japan.

B.3.3 セミナー・ワークショップ

- F1 小田宗兵衛 (2009年3月11日): 「実験経済学と神経経済学の話題から: 「体系からの脱出」をめぐる考察」, 鹿児島国際大学.
- F2 小田宗兵衛 (2008年7月25日): 「経済理論と経済実験: 記述するものの視点と記述されるものの視点」, 『第19回 京都大学交通学セミナー』キャンパスプラザ京都.
- F3 Sobei H. Oda (1 April 2008): 「Viewpoints on Human Behaviour and Learning: Applications from Experimental Economics and Neuroeconomics」, 『seminar in Freeman Centre, University of Sussex』 Brighton, East Sussex, U.K..

- F4 Sobei H. Oda (24 March 2008): 「Experimental Economics, Economics Education and Neuroeconomics」, 『seminar at Panteion University』 Athens, Greek.
- F5 Sobei H. Oda (21 March 2008): 「Experimental Economics, Economics Education and Neuroeconomics」, 『seminar at The Laboratory of Engineering and Management Intelligence, Computer and Automation Research Institute』 Hungarian Academy of Sciences (MTA SZTAKI), Budapest, Hungary.
- F6 Sobei H. Oda (19 March 2008): 「Experimental Economics, Economics Education and Neuroeconomics」, 『seminar at Catholic University of Milan』 Milan, Italy.
- F7 小川一仁・川村哲也・菊谷達弥・小田宗兵衛 (2007年10月27日): 「多市場接触環境において相互協力を達成する戦略について」, 『実験社会科学カンファレンス』早稲田大学.
- F8 金子陽平・西野成昭・小田宗兵衛・上田完次 (2006年12月15-16日): 「被験者実験を用いた不完全情報下の意思決定によるイノベーション普及の分析」, 『第2回国際シンポジウム日本の技術革新—経験蓄積と知識基盤化—』国立科学博物館新宿分館.
- F9 灰谷綾平・小田宗兵衛 (2006年12月2日): 「経済実験の教育効果: 実験参加者が実験から学ぶことと学ばないこと」, 『第10回実験経済学カンファレンス』東京大学.
- F10 小川一仁・井寄幸平 (2006年9月29日): 「経済実験と進化経済学」, 『進化経済学会サマースクール「進化経済学の次なる挑戦課題」』京大会館.
- F11 野澤孝之 (2006年9月22-23日): 「部分パターン安定性からシステム創発へのアプローチ—可逆CAのパターンダイナミクスモデルを題材に—」, 『共創と複雑系シンポジウム』早稲田大学理工学部.

第2部

プロジェクトメンバーの主要論文

神経経済学は経済学に貢献するか？—時間選好の fMRI 実験を例に

小田宗兵衛

1. はじめに

本稿は、神経経済学についての個人的展望を、いま共同研究者とともに進めている時間選好についての神経経済学研究を例に述べるものである。我々の研究はまだ継続中なので、実験の概略と暫定的結論を述べるにとどめ、神経経済学一般に対する批判を検討することで、神経経済学を経済学として適切に位置づけ発展させる方法と方向を探りたい。¹

確率 25 パーセントで 3 万円を得ると、確率 20 パーセントで 4 万円を受けると、どちらが良いかと尋ねると、後者を選ぶ人が多い。しかし、そう答えた人たちに、当たる確率を両方とも 4 倍して、確率 100 パーセントで 3 万円を受けると、確率 80 パーセントで 4 万円を得ると、どちらが良いかと改めて尋ねると、前者を選ぶ人がかなりいる。これはアレのパラドックス [1] として有名で、人間は確率 100 パーセントを特別に高く評価する—99 パーセントと 98 パーセントの差は小さいが、99 パーセントと 100 パーセントの差は大きい—からだと考えられる。²

* 京都産業大学 経済学部

¹本稿の脳活動計測実験は、米田紘康（京都産業大学）との共同研究であり、私立大学学術研究高度化推進事業「オープン・リサーチ・センター」『経済実験による研究と教育：実験から誰が何を学ぶか』（2006-2008 年度）の資金によって実施された。本研究を発表する機会を与えていただいた伊良皆啓治教授（九州大学）、脳科学と脳活動計測実験について指導と助言をいただいた藤井宏教授（京都産業大学）、奥田次郎准教授（京都産業大学）、渡辺正峰准教授（東京大学）、貴重な助言をいただいた学会や研究会の参加者に感謝する。

²アレ本人による数値例はもう少し複雑である。本文では断定的に述べたが、本文の数値例で実験をしたのではない。アレのパラドックスが成立すればそうなるという説明と理解されたい。時間選好の数値例も同様である。

アレのパラドックスは広く実験や質問で観察されるが、現実世界では重要でないかもしれない。なぜなら、あることが 100 回続けて起きても、確率 100 パーセントで起ることだったのか、99 パーセントの確率で起きることによって 1 パーセントの例外が起きなかったのか、当事者には分らないことが多く、確率 100 パーセントを確率 99 パーセントより高く評価したくてもできないからである。じっさい確率が明示されない実験では、必ずしも常にアレのパラドックスは観察されない [2][8]。

100 日後に 100 万円を貰うのと、101 日後に 101 万円を受けると、どちらが良いかと尋ねると、後者を選ぶ人が多い。しかし、そう答えた人たちに、報酬を待つ時間を 100 日ずつ短くして、今すぐ 100 万円貰うのと、明日 101 万円受けると、どちらが良いかと尋ねると、前者を選ぶ人がかなりいる。これも有名な例で、人間は今直ぐを特別に高く評価する—明日と明後日の差は小さいが、今日と明日の差は大きい—からだと理解される。³

確率 100 パーセントを特に重視すること自体は、不合理ではない。確かに、アレのパラドックスは、多くの経済理論の前提となっている期待効用理論の公理系を破る。つまり、アレのパラドックスを顕示する主体の選好は、期待効用理論ではけっして記述されない。これは、期待効用理論に基づく経済理論を維持したい研究者を困惑させるが、期待効用理論に従わない主体が、必然的に不利益を被ったり困難に直面したりするのではない。

いっぽう現在を特に重視することは、もっと深刻な含意を持つ。ある主体が、100 日後に 100 万円か 101 日後に 101 万円を貰えるとしよう。いま後者のほうが望ましいと思っても、もし今日の 100 万円のほうが明日の 101 万円より好ましいと思っていれば、実際には 101 日まで待てないだろう。なぜなら「100 日後の 100 万円か 101 日後の 101 万円か」という選択は、100 日後には「今日の 100 万円か明日の 101 万円か」という選択になるからである。

維持できない意思決定をする主体は合理的でない。それでも、この主体が内省力のない動物なら、自分の不合理な時間選好に悩まずに、時々時間選好に従って行動するだろう。観察者は、それを予測することも、それが個体あるいは種にとってどのような効果を持つかを論じることできる。しかし、人間は、自分の時間選好が矛盾をはらんでいることを自覚できる。不合理な自分を自覚している主体がどのような行動をとるかも、どのような行動をとるべきかも、一筋縄ではいかない問題を含む。

つまり、不確実性下の意思決定と時間選好の標準理論は、人間は待ち時間 0 あるいは失敗確率 0 に特別に高い評価を与えることと、それを標準理論が無視していることの両面で、類似点をもつが、時間選好の歪みのほうが

³本文では簡単のため将来所得の比較として現在重視を説明したが、所得は貸借可能なので、本当に比較すべきは将来消費の列である。

理論的にも実際的にも重大な帰結を導く。しかも、不確実性の評価の理論や実験にも議論の余地があるが、時間選好の理論と実験はいっそう混乱している。じっさい [5] は、1972 年から 2002 年までの 40 余の時間選好の実証研究を調べ、人間が 1 年後の 1 円を現在のいくらかと等価とみなすかは、研究ごとにほとんど 0 から 1 まで大きく異なる上に、このばらつきは研究の進展にもかかわらずいっこうに縮まらないと報告している。個人差が大きいのか、時間選好の測定方法に問題があるのか、実験の制御が不十分なのか、あるいはそれら全てが関わっているのかもしれない。

以上の現状認識と問題意識をもって、第 2 節では時間選好に関連する脳理論と私が共同研究者とともにやっている脳活動計測実験の概略を示し、第 3 節では神経経済学全般について私見を述べる。

2. 脳活動計測実験

2.1 時間選好の脳科学

心理学においても脳科学においても、動物や人間がどのように記憶するかは、主要な研究課題の一つである。宣言的記憶と手続的記憶などの理論的枠組は、数多くの実験と臨床例によって妥当なものと広く認められ、様々な記憶と脳内の独立する神経基盤との対応づけも確認されている。以上の共通理解を前提に最近注目される研究課題は、生物はなぜ記憶するかであり、それに対する有力な回答は、記憶は予見に役立ち、個体の生存に有利だからというものである。¹

記憶と予見を脳がどう結びつけるかの有力な説明は、[3] の自己投影 (self-projection) である。この理論は、記憶と予見は、自分の視点を過去や未来や他人に動かす活動であり、それは medial frontal lobe と medial temporal lobe と medial parietal lobe で構成される「内側前頭葉-側頭葉-頭頂葉ネットワーク」(medial frontal-temporal-parietal network) という共通の神経基盤で実現されると主張する。

この視点の移動という仮説は、他者の意図や知識と関連する問題を考えるときに重要になる「心の理論」を含むだけでなく、[9] が「体系からの脱出」と呼ぶ、自分の思考体系のなかで考えるだけでなく自分の思考体系について考察する能力に関連する。この能力は、ゲームのなかで思考してもゲームについて思考できない計算機エージェントと、一般世界の規範や概念をゲームに持ちこんだり実験者が何のためにゲームをさせるのだろうと推測する人間を区別する重要なものである。この能力が予見に関わるという仮説は、時間選好を未来の自分への自己投影の結果として理解できるかもしれないことを示唆する。²

¹以上のまとめは [17] による。

²人間の思考を形式的体系として定式化しよう。当面の問題に関する考察に十分な体系であればよいので、問

2.2 実験手順

実験は、ATR-Promotions 脳活動イメージングセンタで 2006 年 11 月から 2007 年 9 月まで実施された。被験者は、合計 22 名で、京都産業大学の学部学生 21 名と 20 代の社会人 1 名であった。

被験者は、MRI 装置の中に入り、合計 90 問の二者択一問題に答える。各選択肢は、金額 (最大 8000 円)、受取確率 (40%, 80%, または 100% の 3 種類)、受取日 (今日、1 週間後、または 2 週間後) の 3 つで特徴づけられ、被験者は、たとえば「3000 円を確率 100 パーセントで今日受けとる」と「8000 円を確率 40 パーセントで今日受けとる」のいずれが自分にとって望ましいかを答える。全 90 問のうち 45 問は、上例のように、受取期日は今日で同じで受取確率の異なる選択肢を比較する「危険比較」であり、残りの 45 問は、「5000 円を確率 100 パーセントで 1 週間後に受けとる」か「6000 円を確率 100 パーセントで 2 週間後に受けとる」のように、受取確率は 100 パーセントで同じで受取期日の異なる選択肢を比較する「時点比較」である。実験経済学の標準的方法に従って、被験者は、全ての問に対して正直に答えるように動機づけられた。³

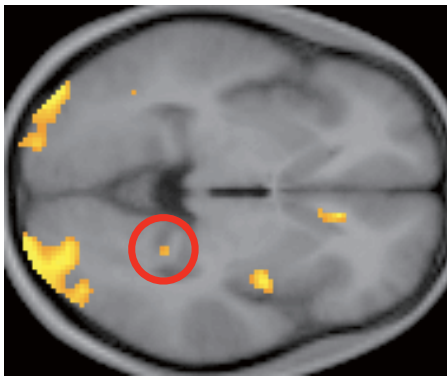
2.3 実験結果

様々な結果を得て分析を進めているが、本稿では「時点比較」で未来 (1 週間後または 2 週間後) の報酬を選んだときの脳活動と、「危険比較」で不確実 (40% または 80%) な報酬を選んだときの脳活動の集団比較の結果だけを示す。

「時点比較」で未来の報酬を選んだときのほうが「危険比較」で不確実な報酬を選んだときよりも有意に賦活したのは、parahippocampal gyrus などであり (図 1)、「危険比較」で不確実な報酬を選んだときのほうが「時点比較」で未来の報酬を選んだときよりも有意に賦活し

題ごとに色々な体系が考えられるが、体系内では決定できない命題、すなわち、それ自身もその否定も体系内では証明できない命題が存在しうる。体系からの脱出能力がなければ、このようなとき推論をいつまでも続けるしかないが、人間は、体系から脱出して「証明できないこと」を新たな知識として推論を再開することができる。[24] と [25] は、簡単なパズルをモデルに、「私は知らない」と確信をもって言うための形式的体系および脱出後の思考構造 (メタ構造) を構築する。

³実験経済学は、被験者の選好を価値誘発理論 [22] に従って制御する。すなわち、被験者への謝金支払を工夫して、実験者の望む選好を被験者に押しつけてゲームをさせる。本文の実験では、実験の前に被験者に以下の謝金支払方法が丁寧に説明された。実験終了後、実験者がランダムに 10 問を選び、被験者はそれらのなかから 1 つを選ぶ。選ばれた問題に対して被験者が実験中にした回答に従って謝金を (必要ならサイコロを振って) 決定し、それをその場で支払うか後日に現金書留で送付する。



第 1 図 parahippocampal gyrus: 不確実な報酬を選ぶより
未来の報酬を選ぶときに賦活する領域のひとつ。



第 2 図 angular gyrus (BA39): 未来の報酬より不確実な
報酬を選ぶときに賦活する領域のひとつ。

たのは、angular gyrus (BA39) などであった (図 2)。⁴

危険比較と時点比較は、第 1 節で述べたように標準的理論も人間行動の標準理論からの乖離も似ているが、異なる脳活動である。じっさい「危険比較」のときのほうが賦活した angular gyrus (BA39) は、一般に計算をするときに活性化するとされる領域であり、「時点比較」のときのほうが賦活した領域は、「内側前頭葉-側頭葉-頭頂葉ネットワーク」である。これは、被験者は、計算によって選択肢の危険を評価し、自己投影によって将来報酬の価値を判断したことを示唆する。¹

⁴実験の実施と画像の解析は、米田紘康による。

¹「時点比較」のときのほうが賦活したのは、図 1 の parahippocampal gyrus に加えて、precuneus, orbito-frontal cortex (OFC), striatum, posterior cingulate cortex (PCC) であった。これらのうち OFC, striatum, PCC は、[11] が将来報酬に対する主観的価値を顕示するときに活動すると報告する領域と重なり、precuneus, parahippocampal gyrus, PCC, 内側の OFC の一部は「内側前頭葉-側頭葉-頭頂葉ネットワーク」に属する。

図 1 では、そのほかに視覚野が賦活している。時点比較のときには未来を視覚的に想像しているのだろうか？

以上の知見は、時間選好が危険評価よりも一個人間でも同一個人についても—いつそうばらつき不安定な理由を説明するだろうか？時点比較のための自己投影は、その思考の難しさとそのための神経基盤「内側前頭葉-側頭葉-頭頂葉ネットワーク」の広がり両面で、危険比較のための計算よりも、被験者の経験や意思決定時の心的身体的状態や環境に強く複雑に依存するように私には思われる。もしこの憶測が正しければ、これが時間選好が危険評価より不安定な理由になるであろう。²

3. 神経経済学に対する批判と展望

3.1 脳科学からの批判

まず fMRI 測定信頼性と意味が問われる。fMRI 測定で人間の認知過程を分析する前提は、心がモジュールでできていることと、そのソフトウェアのモジュールが脳のハードウェアのモジュールとして具体化していることである。これを確立した事実と認めた上で、脳の各部位の動的な相互依存関係を知るために行うのが脳活動計測実験である。かつては脳活動計測といっても、脳のどの部位が賦活したかを知るだけのブロック・デザインであり、素朴な脳活動賦活画像の観察であったが、最近の fMRI は、時間的にも空間的にも解像度が上がり、いつどの部位が賦活したかを明らかにする事象関連デザインに基づいて、複雑な認知過程の脳活動の計測を可能にする。しかし、事象関連デザインは特定の脳理論を前提にしなければならない。この方向への fMRI 実験の発展は、必然であり利益も大きいだが、実験の意義を制限する面ももつ。

[14] は、集計量である血流を測定する fMRI 測定は、仮説を理論的かつ実証的に立てるためには有効だが、認知過程の神経機構の詳細を明らかにしない以上、fMRI 測定だけでどの仮説が本当に正しいかを言うことはできないと述べる。つまり、ある理論にもとづいて脳活動計測実験をして満足のいく解釈を得ても、それ以外の理論に基づく解釈は常に存在するかもしれない上に、前提にされる理論が否定あるいは修正されれば、脳活動計測実

現時点では、時点比較のときの上記以外の賦活の高まりについて自信のある説明を見つけていない。

²本稿の実験で被験者が危険の評価を計算した(あるいは計算ですませた)のは、危険が数値で与えられたからかもしれない。もっと曖昧なかたちで不確実性が与えられれば、もっと複雑な脳活動が観察されるかもしれない(これについての脳活動計測実験については [10] を、行動実験については [21] を見よ)。ただし、本文の実験では、(75 パーセント、9500 円) のように期待値の計算に負担のかかる選択肢は避けられ、(80 パーセント、9000 円) のように実質的に 1 桁どうしの掛算で期待値を計算できるものだけが示された。さらに [23] は、確率を数値ではなく円グラフで与えて、本稿とほぼ同じ時点比較と危険比較の脳活動計測実験をし、本稿とほぼ同じ結果を得ている。曖昧さを含まない危険の評価は一般に計算によるように思われる。

第2.3節の分析は、人間は意思決定において自己投影をし、そのための共通神経基盤として内側前頭葉-側頭葉-頭頂葉ネットワークがあるという仮説に基づく。この仮説は、記憶と予見についての脳科学の研究に基づく有力なものであるが、絶対に正しいとは限らない。上で見たようにこの仮説に基づく脳活動計測実験の解釈は行動実験の結果をうまく説明するが、それ以上の主張をできない。自己投影理論も我々の時間選好の解釈も、[14]の指摘するように、ひとつのfMRI実験だけにに基づくのではなく、様々な脳活動計測実験や行動実験を行って、信頼度を高めなければならない。¹

3.2 経済学からの批判

第2.3節のような研究に対して、経済学からは2種類の批判がある。

まず、経済学を現実世界とは無関係な形式科学とする立場からの神経経済学批判がある。これは、経済学は制約条件下での最適化問題という立場からの批判であり、現実の人間の選好を調べてそれに基づいて理論を展開するよりも、任意の選好のもとでの意思決定を一般的に定式化するほうが確実に応用のきく知識体系になるという主張である。²

この立場からは、経済学が脳科学に応用されることはあっても、脳科学が経済学の基礎になることはない。じっさい[6]は、最適化問題の体系的知識としての経済学が脳研究全般に有用なことを強調する。この立場からは、脳科学は、たとえ疑問の余地なく確立しても、経済学にとって本質的役割をもたない。まして脳理論が必ずしも確立していない現状で、特定の脳理論（たとえば自

選好）を説明しても、得るものは何もない。

さらに経済学を社会の規範分析とみなす立場から、神経経済学は有害無益との批判がある。これは、主体の意思決定の合理性は市場で観察される主体の行動だけに基づいて判断されるという主張である。

神経経済学が無益なのは、標準的経済学は顕示選好理論に立脚する経験科学だからである。すなわち、主体の行動が適当な条件を満たしているかぎり、ある効用関数が存在して、その主体は、本人が意識しているかいないかは無関係に、その関数の定める効用を最大化するように行動したと見なされる。そして各人が各人の効用を最大化するかぎり、標準的経済学の諸命題が成立し、厚生を分析できる。この立場からは、重要なのは市場で観察される各人の顕示選好が合理性の基準を満たすか否かであり、各人の脳内活動がどうであるかを知る意味はない。

神経経済学が有害なのは、神経経済学は首尾一貫する意思決定主体としての人間を尊重しないからである。[7]は、一見すると不合理な時間選好も、数学的表現を工夫すれば、標準的で合理的な効用関数の最大化として定式化できるものがあることを指摘し、そうすれば一見すると不合理な時間選好を顕示する主体も、一般化された効用関数を最大化していると思われ、標準的な経済分析を適用できると主張する。そして、このように一見不合理な人間でも合理的意思決定主体と思わせるように工夫することが、経済学を個人の選択の自由を認める科学として維持するために必要であり、この努力を放棄して人間を無矛盾な選好を維持できない不合理な存在と積極的に見なす神経経済学は、本人ではなく外部の誰かの価値観に従って各人の合理的行動を定義し、それに従って行動するように個人の自由な行動を抑制する家父長的政策を導くと批判する。

3.3 神経経済学は何を目指すか

対象を特定しない形式科学としての経済学の有用性は確かに大きい。現実の経済を対象とする経済学も必要である。現実の人間や社会を対象として分析しようとするれば、「もしAならばBである」を証明するだけでなく「Aである」ことを実験や観察で確かめなければならない。

[7]の主張は、経済学を形而上学でなく実証科学として確立するためには顕示選好が必要十分というものである。確かに、ある主体の選択が、顕示選好の公準を満たすかぎり、その主体は標準的理論の要請する合理的選好をもつ。すなわち、ある効用関数が存在して、主体は、それを意識しているか否かとは無関係に、その関数を最大化するように行動していると思われうる。

とはいえ、「顕示選好の公準を満たさない」とは「観察される行動を最大化問題として合理化する関数は1つも存在しない」という意味で、非常に厳しい条件である。

³[14]は、さらに以下の2点を指摘する。(a) 脳の皮質インプット→情報処理→アウトプットは、必ずしも個体の知覚→認識作用→行動を意味しない。(b) 賦活の高まりは、行動刺激の高まりとはかぎらない。行動抑制の高まりかもしれない。

¹[15]は、直近の未来の報酬に対してだけ反応する領域があることを示し、現在重視の時間選好、とりわけ[13]の β - δ 理論—1円の価値は、1期間たつごとに θ , θ^2 , θ^3 , ... ($0 < \theta < 1$)と減価するのではなく、 $\beta\delta$, $\beta\delta^2$, $\beta\delta^3$, ... ($0 < \beta < 1$, $0 < \delta < 1$)と減価するという理論—をもたらす神経基盤とした。ただし、[11]は、これほど極端に直近の未来の報酬にだけ反応が異なるのではないと主張する。じっさい[23]も我々も、特に直近の未来の報酬を選ぶとき、あるいは選ぶときに、特別な脳活動を観察していない。

²サムエルソンは、制約条件下の最大化こそ経済学のあらゆる研究の背後に存在する単純な原理と主張し[20]、彼のノーベル賞受賞記念講義(1970)でも最大化は経済学の基礎そのものと述べた。本文は、この主体の最適化行動に基づいて経済を理解する経済学を標準的経済学と想定して神経経済学と対比する。[18]は、この考え方を批判的に経済学史に位置づける。

現実世界で観察される行動は、数も限られ得られる情報も不完全であるのに、これを事後的に説明する関数の候補は、理論家の想像力の及ぶかぎり無数にある。観察に基づいて合理性を否定されることは、実際にはそうないであろう。ヨッパライの行動といえども、それを最大化行動と定式化する関数が存在するかもしれない。神経経済を含め行動経済学一般に批判的な[19]も、個人の意識的意思決定とも意識的満足とも関連づけられない抽象的な効用関数に基づいて個人の行動も社会の厚生も論じられないと、[7]の時間選好関数の一般化に反対する。³⁴

個人を不合理な存在とみなすことが家父長的政策提言に繋がるという[7]の指摘は重要であるが、無理矢理に個人は合理的と見なすのは無批判の現状追認に墮するかもしれない。私は、X君が肉体的苦痛を最大にするように行動しているように見れば、X君は治療を受ける(受けさせる)ほうが良いと家父長の助言をするかもしれない。しかし、それは私の価値観の押しつけで、X君が苦痛を最大化するよう見えるなら、苦痛がX君の効用でX君は合理的にそれを最大化すると見なして、X君の選択の自由に任せるべきだと言う人もいるだろう。これ以上は水掛け論になるが、[7]は、X君の主観的満足を否定する私の家父長的助言が、私の主観的意見としてではなく、神経科学に基づく客観的事実として主張されること

³[19]は、行動経済学研究者は、経済分析の間口を拡げていると主張するが、実態は敷居を下げていただけと批判する。彼によれば、行動経済学研究者は、面白そうな話題を甘い観察に基づいて主張する—たとえば、ある保育園が、子供を引取る時刻に遅れる親が多いので、引取時刻に遅れた親に罰金を課し始めたら、引取時刻に遅れる親が増したが、これは、お金を余分に払うのだから保育園に余分に負担をかけてもかまわないだろうと親が思ったからである—だけで、研究相互で批判や再現性の確認もしない。この批判がすべての行動経済学研究者に当てはまるとは思わないが、基礎的な社会学や心理学の訓練を欠いたまま素朴な実験や観察の示唆する解釈を確実で一般的なものとして主張することがあってはならないのは当然である。

⁴本文では顕示選好によって合理性を否定されることは現実にはあまりないだろうと述べたが、それは定義域の次元を好きだけ高くって抽象的な関数をいくらでも考えられる場合を念頭においてのことである。選べる関数に限りがある選択問題では、明白に不合理な選好が簡単に顕示されることがある。たとえば、ある人が、AとBのいずれかを選べと言われて、Aを選んだとしよう。もしこの人が確固たる選好をもっていれば、AとBとCの中から1つ選べと言われてBを選ぶことはない。しかし、現実にはこのようなことが例外としてではなく通例として生じうる。じっさい[12]は、多くの人、法的意思決定において、同じ選択肢でも、極端な案ではなくほどほどの案として示されたり、明らかにそれより劣る選択肢と一緒に示されたりすると、高く評価することを確かめている。

の社会的帰結を恐れているのだろう。

[7]の懸念は根拠のあるものだろうか?脳科学の進歩は急速かつ広範なので、人間の尊厳を否定する方向への研究や技術開発に研究者は警戒しなければならない[16]。神経経済学を研究する動機は研究者それぞれなので、人間の幸福を脳活動に基づいて客観的に定義・計測して、経済学から顕示選好や効用関数を追出そうという野望をもっている研究者もいるかもしれない。しかし、神経経済学研究者の多くが幸福の客観的測定とそれに基づく経済学の樹立を目指しているとは、私は思わない。

[4]は、神経経済学の目的と方法について色々なことを述べるが、私は、彼らの主張の核心は(a)意思決定の意識的過程および(b)感情に基づく動機づけの理解を深めるために脳活動を知ることだと思う。前者は、きちんと均衡が成立しているときには重要ではないかもしれないが、限られた時間と予算と情報と計算力の中での均衡への模索過程や不均衡での取引を特徴づける重要な要因の一つであり、後者は、目標が決まれば適当に定義される最適化行動をとるとしても、そもそも何を目標にするかを決めるとき重要な役割を果たすと考えるからである。

私は、神経経済学について以上の理解と見通しをもっている。具体的に神経経済学の成果があがって、方法論の擁護や社会と科学への貢献について抽象的な議論をするまでもなく、神経経済学が適切に位置づけられる日が来るように、共同研究者と共に努力を続けたい。

参考文献

- [1] Allais, Maurice: “Le comportement de l’homme rationnel devant le risque, critique des postulats et axiomes de l’ecole americaine”, in *Econometrica* vol. 21, pp. 503-546, (1953).
- [2] Barron, Greg & Ido Erev: “Small feedback-based decisions and their limited correspondence to description-based decisions”, in *Journal of Behavioral Decision Making* vol. 16, pp. 215-233, (2003).
- [3] Buckner, Randy L. & Daniel C. Carroll: “Self-projection and the brain”, in *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 11, pp.49-57, (2007).
- [4] Camerer, Colin F. & George Loewenstein & Drazen Prelec: “Neuroeconomics: how neuroscience can inform economics”, in *Journal of Economic Literature*, vol. 43 (no. 1), pp. 9-64, (2005).
- [5] Frederick, Shane & George Loewenstein & Ted O’Donoghue: “Time discounting and time preference: a critical review”, in *Journal of Economic Literature*, vol. 40 (June), pp. 351-401, (2002).
- [6] Glimcher, Paul W.: *Decisions, uncertainty, and the brain: the science of neuroeconomics*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, (2003); 宮下英三【訳】: 『神経経済学入門—不確実な状況で脳はどう意思決定するのか』, 生産性出版, (2008).
- [7] Gul, Faruk & Wolfgang Pesendor-

- fer: “The case for mindless economics”, <http://www.princeton.edu/~pesendor/mindless.pdf>, (2005).
- [8] Hertwig, Ralf & Greg Barron & Elke U. Weber & Ido Erev: “Decisions from experience and the effect of rare events in risky choice”, in *Psychological Science* vol.15, pp. 534-539, (2004).
- [9] Hofstadter, Douglas R. : *Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid, 20th anniversary edition*, Basic Books, New York, USA, (1979); 野崎昭弘・はやしはじめ・柳瀬尚紀【訳】: 『ゲーデル, エッシャー, バッハ—あるいは不思議の環 (20周年記念版)』, 白揚社, (2005).
- [10] Hsu, Ming & Meghana Bhatt & Ralph Adolphs & Daniel Tranel & Colin F. Camerer: “Neural systems responding to degrees of uncertainty in human decision-making”, in *Science*, vol. 310, pp.1680-1683, (2005).
- [11] Kable, Joseph W. & Paul W. Glimcher: “The neural correlates of subjective value during intertemporal choice”, in *Nature Neuroscience*, vol. 10 (no. 12), pp.1625-1633, (2007).
- [12] Kelman, Mark & Yuval Rottenstreich & Amos Tversky: “Context-dependence in legal decision making”, in *The Journal of Legal Studies*, vol. 25 (no. 2), pp. 287-318, (1996).
- [13] Laibson, David: “Golden eggs and hyperbolic discounting”, in *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 112, pp. 443-477, (1997).
- [14] Logothetis, Nikos K.: “What we can do and what we cannot do with fMRI”, (2008). in *Nature*, vol. 453, pp. 869-878.
- [15] McClure, Samuel M. & David I. Laibson & George Loewenstein & Jonathan D. Cohen: “Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards”, in *Science*, vol. 306, pp.503-507, (2004).
- [16] Moreno, Jonathan D.: *Mind Wars: Brain Research and National Defense*, Dana Press, New York, USA, (2006); 西尾香苗【訳】, 久保田競【監訳】: 『マインド・ウォーズ 操作される脳』, アスキー・メディアワークス, (2008).
- [17] 奥田次郎: 「未来への予見に携わる」, 『玉川大学脳科学研究所紀要』, 第1号, pp. 13-23, (2008).
- [18] Pasinetti, Luigi, L. : *Structural Change and Economic Growth: A Theoretical Essay on the Dynamics of the Wealth of Nations*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, (1981); 大塚勇一郎・渡会勝義【訳】: 『構造変化と経済成長—諸国民の富の動学に関する理論的エッセイ』, 日本評論社, (1983).
- [19] Rubinstein, Ariel: “Discussion of “Behavioral economics”: “Behavioral economics” (Colin Camerer) and “incentives and self-control” (Ted O’Donoghue and Matthew Rubin)”, in *Advances in Economics and Econometrics: Theory and Applications, Ninth World Congress. Volume 2 (Econometric Society Monographs, no. 42)* edited by Richard Blundell & Whitney K. Newey & Torsten Persson, Cambridge University Press, Cambridge and New York, pp. 246-254, (2006).
- [20] Samuelson, Paul, A.: *Foundation of Economic Analysis*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., USA, (1947); 佐藤隆三【訳】: 『経済分析の基礎 (増補版)』, 勁草書房, (1986).
- [21] Shafir, Shari & Taly Reich & Erez Tsur & Ido Erev & Arnon Lotem: “Perceptual accuracy and conflicting effects of certainty on risk-taking behaviour”, in *Nature*, vol. 453, pp. 917-920, (2008).
- [22] Smith, Vernon L.: “Microeconomic systems as an experimental science”, in *American Economic Review*, vol. 72, pp. 923-955, (1982).
- [23] Weber, Bethany J. & Scott A. Huettel: “The neural substrates of probabilistic and intertemporal decision making”, in *Brain Research*, vol. 1234, pp.104-115, (2008).
- [24] Yasugi, Mariko & Sobei H. Oda: “A note on the wise girls puzzle”, in *Economic Theory*, vol. 19 (no. 1), pp. 145-156, (2002).
- [25] Yasugi, Mariko & Sobei H. Oda: “Notes on bounded rationality”, in *Scientiae Mathematicae Japonicae*, vol. 57 (no. 1), pp. 83-92, (2003).

著者紹介

小田宗兵衛 (おだ・そうべえ)

京都産業大学経済学部教授, 京都大学経済学部・同大学院博士前期課程を修了し, ミラノ聖心カトリック大学およびサセックス大学で学ぶ (D. Phil). 京都産業大学経済学部講師, 同助教授をへて1999年から現職, 日本経済学会会員. 専門は, 多部門成長理論, 実験経済学.



INTERNATIONAL JOURNAL OF INDUSTRIAL ORGANIZATION

Volume 27, Issue 2, March 2009 ISSN 0167-1717

CONTENTS

Software exclusivity and the scope of network effects in the U.S. horse video game market K.S. Cortis and M. Lerner	121
Price exchange in collusion: Empirical study of repeated procurement auctions in Japan Z. Jiao	137
Using user effects for cartel formation and the enforcement power of leniency programs T. Homaguchi, T. Kawagoe and A. Shikata	145
Ability, location and household demand for Internet bandwidth A.J. Sengur and J.M. Waldman	160
Sequential cross-border mergers E. Fumagalli and A. Iannaccone	175
Regulating innovation: Revealing the merger efficiency gains A. Farnon and J.-P. Png	189
Price dispersion in oligopoly with heterogeneous consumers M. Sestini	197
Undercutting brands with imperfect observability and moral hazard L.M.R. Cabral	206
Entry and exit by new entrants entering times J.M. Pflughaupt	214
Managerial cost competition and the adoption of hospital technology: The case of cardiac catheterization D.A.S. Bhattar	221
Wages and efficiency of vertical integration, 1996-2004 M. Gupta and T. Fritschner	238
Are firms really less porous? M. Fugère, M. Huchon and Y. Suss	250
Merger performance under uncertain efficiency gains R. Amir, T. Chatterjee and I. Lior	264

(Contents continued on last page of this issue)

Available online at
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

27 (2) 121-332
(2009)

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Industrial Organization

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijio

Group size effects on cartel formation and the enforcement power of leniency programs[☆]

Yasuyo Hamaguchi^{a,*}, Toshiji Kawagoe^b, Aiko Shibata^c

^a Nagoya City University, 1 Yamanohata, Mizuho-cho, Mizuho-ku, Nagoya, 467-8501, Japan

^b Future University-Hakodate, 116-2 Kameda Nakano-cho, Hakodate, Hokkaido, 041-8655, Japan

^c Fair Trade Commission of Japan, 1-1-1 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8987, Japan

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 June 2006

Received in revised form 21 May 2008

Accepted 21 May 2008

Available online 3 June 2008

JEL classification:

C92; D43; K21; K42

Keywords:

Leniency programs

Cartels

Collusion

Antitrust law

Experiment

ABSTRACT

Antitrust authorities in many countries have been trying to establish appropriate competition policies based on economic analysis. Recently an anti-cartel policy called a “leniency program” has been introduced in many countries as an effective policy to dissolve cartels. In this paper, we studied several kinds of leniency programs through laboratory experiments. We experimentally controlled for three factors: 1) cartel size: the number of cartel members in a group, small (two-person) or large (seven-person), 2) fine schedule: the number of firms that are given leniency, and 3) degree of leniency: a partially reduced fine, a fully reduced fine, or a reward is given to self-reporting firms. The experimental results showed that (1) an increase in the number of cartel members in a group increased the number of cartels dissolved, (2) changing the fine schedule had no significant effect both in the two-person group size and in the seven-person group size, and (3) positive enforcement such as giving a reward for a self-reporting firm in a courageous leniency program has great impact on dissolving cartel activities.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Cartels, collusions among competing firms, harm the social welfare of consumers by restricting competition in markets. Such market restrictions include entry barriers, market-dividing activities, price fixing, and volume controlling. The major role of antitrust authorities (referred to hereafter as AA) is to restrain cartels. For example, the Japan Fair Trade Commission (JFTC) made recommendations for 19 cases of price fixing cartels and bid riggings in fiscal year 2005. Surcharge orders, which are legal means to confiscate excessive profits created by cartels, were imposed on 399 firms and the total amount of the surcharges amounted to 188.7 billion yen in fiscal year 2005.

An international trend is one of strengthening fines and surcharges. For example, JFTC submitted a major amendment to the

Japanese Antimonopoly Act to the Diet in 2005 and the amendment was enacted in 2006. The essential features of the revisions are that the basic surcharge rate shall be increased from 6% to 10%, and that a leniency program shall accompany the surcharge system.¹ Lowe (2003) describes EU's future fine policy as follows:

The trend is clearly one of increasing fines, in order to achieve a genuine dissuasive effect on firms. In 2001, the heaviest individual fine yet, 462 million euros, was imposed against Hoffman–LaRoche in the *Vitamins* case. In 2002, the second highest amount ever, 250 million euros, was imposed against Lafarge for its participation in the *Plasterboard* cartel. Other significant fines were those imposed on the BPB, also in *Plasterboard*, 139 million euros and 118 million euros for Degussa for its role in the *Methionine* conspiracy.

In order to raise the probability of detecting cartels and to deter cartel activities, leniency programs have been implemented in many countries, such as the EU, the US, Canada, Australia, and Korea. They have proven that the program is a very effective device to detect cartels. A typical leniency program is carried out in the following way. If a member of a cartel group resigns from the cartel and reports himself to the AA with sufficient evidence of his cartel activity sooner

[☆] We would like to thank Sobei H. Oda and his assistants for their support and letting us use the Kyoto Sangyo University economics laboratory. We also thank Yoshio Iida for his advice on z-Tree programming. In addition, we thank Bram Cadsby, Martin Dufwenberg, Nicholas Feltovich, Massimo Motta, Patrick Rey, Fei Song and Noriyuki Yanagawa for their helpful comments and encouragement. We would also like to thank the anonymous referee for comments on our first submission, which improved this paper significantly. This research was partially supported by the Ministry of Education, Science, Sports and Culture, Grant-in-Aid for Young Scientists. The views expressed here are the personal views of the authors and do not reflect those of the institutions to which they belong. The names of the authors are listed in alphabetical order.

* Corresponding author.

E-mail addresses: yhamagu@econ.nagoya-cu.ac.jp (Y. Hamaguchi), kawagoe@fun.ac.jp (T. Kawagoe), shibataa@areninc.com (A. Shibata).

¹ According to the JFTC's annual reports, a formal action means recommendations or surcharge payment orders without cease and desist orders preceding.

than other cartel members, then his firm will be given full leniency and will be exempted from paying a fine at all. In the EU, which initiated its policy in 1996 and then made revisions in 2002, between 1996 and 2002, more than 80 firms cooperated with the EC Commission under the leniency program and out of a total of 24 decisions imposing fines, firms in 17 cases cooperated with the Commission under the leniency scheme.² Under the 2002 Notice, 160 applications were filed in three and a half years.³ JFTC initiated a leniency program in 2006 and in fifteen months it received 105 leniency applications.⁴ That is, the number of leniency applications has been increasing dramatically.

There are some theoretical studies on various kinds of leniency programs using repeated game theory. Motta and Polo (2003) examined a leniency program in a repeated game setting and then they identified the equilibrium conditions to sustain collusion under the leniency program. In a similar model, Hinloopen (2002) theoretically analyzed European style leniency programs. In the European style leniency programs, a fine is considered to be proportional to gross annual sales of a firm (maximum fine up to 10% of total sales). Hinloopen showed that it is highly unlikely for a cartel member to report information to the AA unless the probability of detection and/or a fine are unrealistically high. Brisset and Thomas (2004) obtained very similar results in the simplified first price auction settings. Compared with the European leniency program, Spagnolo (2000) proved that courageous leniency programs, which give rewards to self-reporting firms, may deter collusion completely and costlessly. Furthermore, Aubert et al. (2006) consider bounty mechanisms, which give a reward to an employee who informs his employer about illegal activity within their company.

Although these theoretical studies have been done, to the best of our knowledge, only a few experimental investigations have been carried out so far. Apestequia et al. (2007) investigated leniency programs in a one-shot Bertrand competition framework theoretically and experimentally. They compared several variations of leniency programs including a courageous leniency program proposed by Spagnolo (i.e. giving a reward to applicants for the leniency programs) to determine whether or not the programs deter cartel activities. They found that the rate of cartel formation was the highest in the case that a reward was provided for the action of reporting, which contradicts the theoretical predictions. Hinloopen and Soeteven (2008) extended Apestequia et al.'s study to the repeated game framework. They found that the leniency program is effective at lowering prices. However, they also found that the effect is not strong enough against cartel recidivism.

In many leniency programs, the first reporter has more advantageous immunity over later reporters. This might make cartel members to rush to report to the AA to get the highest leniency. If this is true, then the leniency program which allows only the first reporter to get the highest leniency is more effective than the one which gives leniency to more than one reporter. In addition to that, the former policy might be more successful at finding cartel activities without increasing enforcement costs than the latter one. Since only unilateral deviations from the equilibrium are to be considered according to the Nash equilibrium concept, the equilibrium predictions in the two-person game models used in previous studies can be applied to the case where the game consists of more than two players and to the case where the fine schedule is limited only to the first reporting firm. However, we are not sure whether these predictions are true in real situations. If every firm involved in a cartel activity can give legally sufficient cartel information to the AA, the cartel can be dissolved easily just by one firm reporting. That might make each cartel member rely less on collusion as the number of cartel members increases. In addition, cartels might be dissolved much faster with the leniency program than without it, since if a firm reports the cartel information

to the AA, they can avoid a considerable fine when the cartel is detected by the AA. Furthermore, such a deviation from collusion could be accelerated if only the first reporting firm can avoid the fine and others get a penalty. This tendency might be further reinforced by introducing a courageous leniency program which gives a reward for the reporting firm.

To investigate these institutional design issues, we must consider what the crucial variables that the AA can manipulate to prevent firms from forming cartels are. The variables the AA can control but firms can not are the probability of investigation and the level of the surcharge or fine. Those variables can greatly influence the incentive of firms for cartel formation. If the probability of being caught and the fine are very low (or high), firms believe that the expected profits that they could gain from the cartel would be greater (or smaller) than the expected losses from being caught.

Based on the considerations above, we experimentally controlled the following three factors to compare several institutional designs of leniency programs in a simplified oligopoly market:

- (1) Cartel group size: the number of cartel members in a group is either small (two members) or large (seven members).
- (2) The fine schedule: the number of firms that are given leniency is either only the first deviator (i.e. the first reporter of cartel information) or all deviators.
- (3) Degree of leniency: the firms that deviated from their cartel receive (1) partially reduced fines, (2) fully reduced fines or (3) rewards.

The model in our experiments is as follows. First, we assume that every firm has already reached collusive agreement and formed a cartel before the game (as the equilibrium condition mentioned later assures). They know the probability of being investigated by the AA, which is common knowledge among firms. Then, they voluntarily and independently decide whether or not to report the cartel information to the AA. If at least one player in a group reports the information, then the evidence of their collusion is revealed to the AA with certainty, and all but the players who reported the information suffer the full fine. The players who reported the information can receive either (1) exemption from penalty to some degree, (2) full exemption, or (3) reward. If no one in a group reports the cartel information, the collusion is detected by the AA with a certain probability, and every member of the group suffers the full fine if their collusion is detected.⁵

Although it is very important to investigate whether people would collude in the beginning under the leniency programs, the issue we deal with here is limited only to how the leniency program works under the situation where firms have already committed to colluding with each other.⁶ There are a vast number of experimental studies on the prisoners' dilemma. Whether people are cooperative or not in the game is not the issue we deal with here.

The experimental results showed that (1) the large size cartel (7-person group) is more easily dissolved than the small size cartel (2-person group) under the leniency program; (2) the fine schedule (all reporters can get leniency or only the first reporter can) does not affect the likelihood of cartel continuation; (3) positive enforcement, such as giving a reward to reporters (courageous leniency program), has a greater impact on dissolving cartel activities.

The organization of the paper is as follows. The theoretical model we used in our experiment is explained in the next section. Our experimental design and procedures are explained in Section 3, and

⁵ We assume that the AA can verify the cartel information with certainty, if the firm they investigate is involved in a cartel.

⁶ This is the situation where each cartel member has been locked in a cartel, so they do not doubt whether other members are colluding with their firm or not. But they can decide whether to report their crime to get some immunity from the authority. By controlling the starting strength of the cartels, we can genuinely focus on the impact of the leniency program on hardcore cartels.

² See Monti (2002).

³ EC's *Competition Policy Newsletter*, Autumn 2005.

⁴ See Takeshima (2007).

Table 1
Two-person prisoners' dilemma game

Player 1	Player 2	
	Cooperate	Defect
Cooperate	π_C, π_C	π_{CD}, π_{DC}
Defect	π_{DC}, π_{CD}	π_D, π_D

Note 1: $\pi_{DC} > \pi_C > \pi_D > \pi_{CD}$.

Note 2: In the experiment, $\pi_{DC}=60, \pi_C=40, \pi_D=20, \pi_{CD}=10$. However, π_{DC} and π_{CD} were never realized since we did not allow subjects to deviate in Stage 1.

experimental results are discussed in Section 4. Finally, conclusions are given in Section 5.

2. Model

The theories on leniency programs are usually based on the prisoners' dilemma game (e.g. Motta and Polo, 2003). The structure of this game is shown in Table 1.

Once a leniency program is introduced, one more stage is added to the prisoners' dilemma game. Assuming that players commit to a

cartel with certainty initially, we use the following two-stage game as a baseline game. It represents a simple oligopoly market.

Stage 1. Players collude with each other (choosing the “Cooperate” strategy in Table 1).

Stage 2. Without knowing whether the AA will investigate the players, they decide whether or not to report about their Stage 1 collusion to the AA. They make this decision independently and simultaneously without communication. Players only know the probability of investigation, p ($0 < p < 1$).

Fig. 1 shows the game structure for the 2-person case in which a reduced fine is given to all reporters.

The incentive structure for the three degrees of leniency is as follows. If both players do not report to the AA in the second stage and the AA did not happen to investigate them, then each player can enjoy the cartel profits (π_C) for the round. If both players do not report but the AA investigates the players, then both players suffer a full fine (F) for the round. On the other hand, if a player deviated in the second

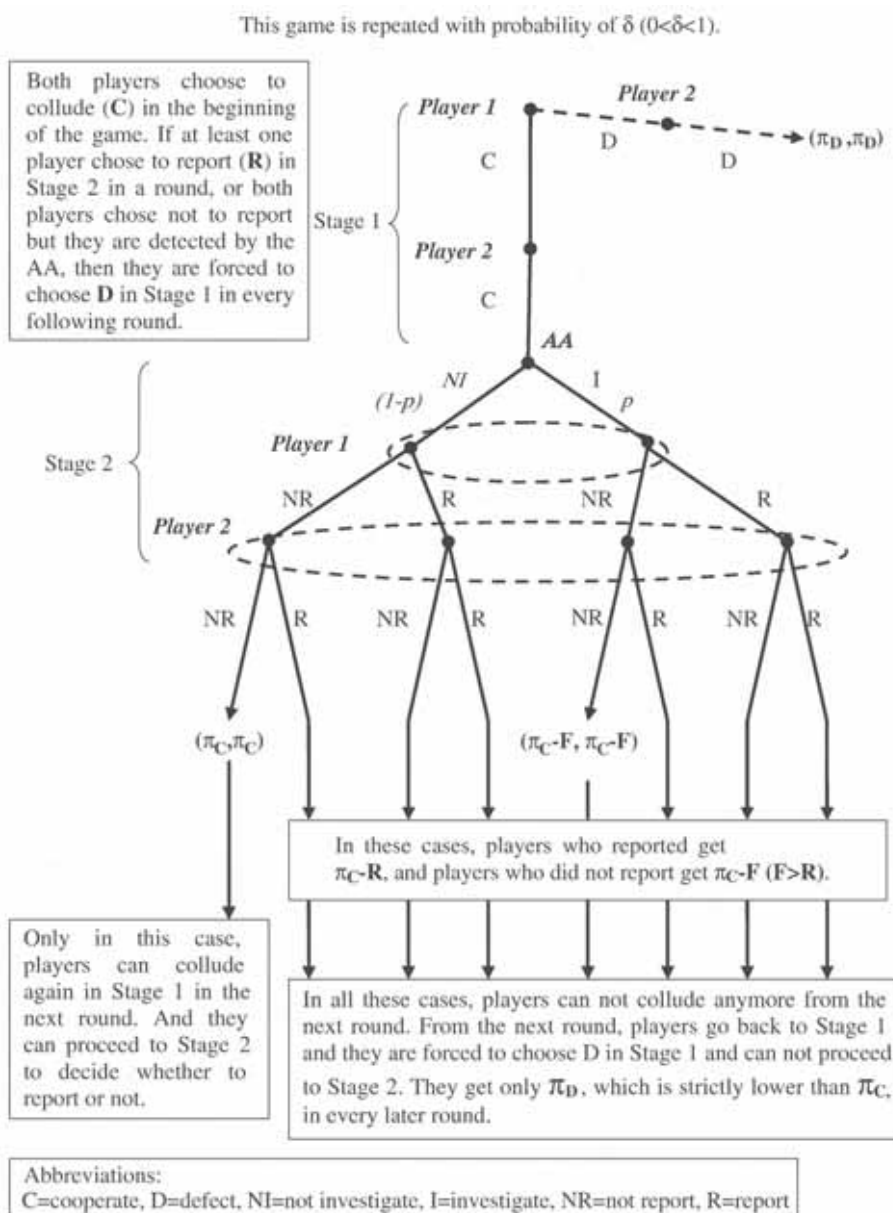


Fig. 1. The game tree for the case for immunity for all (2-person case).

stage (reported to the AA), that player can receive partial or full exemption from a fine (reduced fine= $R (<F)$), or get a reward (R'), while the other non-reporting player suffers the full fine for the round. The game is repeated with probability δ ($0 < \delta < 1$), and the probability is high enough that maintaining collusion is profitable to players. If players can successfully maintain collusion (by not reporting) and the AA does not detect the collusion, then they go back to Stage 1 to commit collusion again and proceed to Stage 2 to decide whether to report or not. However, once the collusion is detected by the AA, or once at least one player deviated in the second stage, both players cannot collude anymore in the later rounds. They fall under the AA's control, and are forced to choose to defect in the first stage in all the later rounds. They get only a competitive profit (π_D) which is strictly lower than the cartel profits (π_C) in every later round.

In the reward case, the reward R' for a reporting firm is a fraction of fines collected from not-reporting firms. The sum of fines collected from not-reporting firms is distributed to reporting firms, that is, $R' = \alpha \cdot \frac{F \times N_{NR}}{N_R}$, where N_{NR} is the number of players who did not report, N_R is the number of players who reported, and α is a constant parameter.

Let us consider the incentive conditions for sustaining the collusion. As we explained above, we assume that both players employ the following trigger strategy: each player maintains collusion (not reporting) as long as the other player does so. If one player deviates from the collusion (by reporting), the other player will never collude with the player again. Based on this trigger strategy, we can calculate the discounted payoffs for the not-reporting strategy and the reporting strategy in the standard repeated game analysis. In the following discussion, we examine whether a player has an incentive for unilateral deviation when his partner chooses the strategy of not reporting.

(1) The expected payoff for the not-reporting strategy (π_{NR})

In this case, a player i does not defect from the collusion. However, if the pair is investigated by the AA (with probability of p), both players suffer the full fine F and they can not collude again in all the rounds thereafter. On the other hand, if the pair is not investigated by the AA (with probability of $(1-p)$), they can continue to collude in the next round, too. Therefore, the expected payoff for this strategy with the discount factor (probability of repetition of the game, δ ($0 < \delta < 1$)) and p is as follows.

$$\begin{aligned} \pi_{NR} &= p \left[(\pi_C - F) + \delta \pi_D + \delta^2 \pi_D + \dots \right] + (1-p) \cdot [\pi_C + \delta \pi_{NR}] \\ &= p \left[(\pi_C - F) + \frac{\delta \pi_D}{1-\delta} \right] + (1-p) \cdot [\pi_C + \delta \pi_{NR}] \end{aligned}$$

Rearranging,

$$\pi_{NR} = \frac{p}{1-\delta+p\delta} \left[\pi_C - F + \frac{\delta \pi_D}{1-\delta} \right] + \frac{1-p}{1-\delta+p\delta} \pi_C \tag{1}$$

(2) The expected payoff for the reporting strategy (π_R)

In this case, a player defects in the second stage. The defecting player receives a reduced fine R or a reward R' , while the other player suffers the full fine F . The pair can not collude in all the rounds thereafter. The expected payoff for the reduced fine case is as follows.

$$\pi_R = (\pi_C - R) + \delta \pi_D + \delta^2 \pi_D + \dots = (\pi_C - R) + \frac{\delta \pi_D}{1-\delta} \tag{2}$$

From the calculations above, $\pi_{NR} \geq \pi_R$ is the necessary and sufficient condition for each player to sustain the collusion as an equilibrium (if they follow the trigger strategy explained above). In our experimental setting, the payoff from one-shot collusion (π_C) is 40 and the payoff from not colluding is 20 (π_D). The fine (F) is equal to π_C (=40), the partially reduced fine (R) is 5, the discount factor (δ) is equal to 0.8, and the probability of investigation (p) is 0.1, so π_{NR} is set equal to 157.14 and π_R is set equal to 115 for the case that the reduced fine is given to

reporting firms. Obviously when a reporter gets full immunity from fine, π_{NR} is still strictly higher than π_R (=120). For the case when the reward is given to reporting firms, π_{NR} is the same as in the reduced fine case (=157.14) (since nobody gets any reward). The expected payoff for the reporting strategy is

$$\begin{aligned} \pi'_R &= \left(\pi_C + \alpha \frac{F \times N_{NR}}{N_R} \right) + \delta \pi_D + \delta^2 \pi_D + \dots \\ &= \left(\pi_C + \alpha \frac{F \times N_{NR}}{N_R} \right) + \frac{\delta \pi_D}{1-\delta} \end{aligned} \tag{3}$$

set equal to 144, where α is 0.6 for the 2-person case. Therefore, firms have an incentive to maintain collusion in all these cases, and all of the leniency programs might be too weak to dissolve cartels.⁷

These incentive conditions cannot exclude other equilibria. Our game can be reduced to a kind of stag-hunt game in which both the reporting strategy and the not-reporting strategy are equilibria. We set payoffs for the repeated game so that for both players not reporting is the payoff-dominant equilibrium.⁸ Therefore, we make the following hypothesis:

Hypothesis 1. None of these leniency programs can deter cartels at all.

Since only unilateral deviation from equilibrium is considered according to the Nash equilibrium concept, these conditions can be applied not only to the game which consists of two players but also to the game which consists of more than two players. Therefore, we make the following hypothesis.

Hypothesis 2. The not-reporting strategy is observed dominantly in both the two-person case and in the seven-person case.

Furthermore, the same equilibrium conditions can be applied to the case where leniency is limited to only the first reporting player. To pursue such an institutional design issue, we compared different fine schedules. One schedule is that only the first reporter can get a reduced fine or a reward. The other schedule is that all reporters can get the fully or partially reduced fine or the reward. We make the third null hypothesis as follows.

Hypothesis 3. The rate of collusive groups is close to 1 in both fine schedule cases (the first reporter is given leniency or all reporters are given leniency).⁹

Although the difference of expected payoffs between the reporting strategy and the not-reporting strategy is smaller in the reward case than in the reduced fine case, the expected payoff for the not-reporting strategy is strictly higher than the one for the reporting strategy in both cases. Therefore, we make the fourth hypothesis:

Hypothesis 4. The frequency of collusion is close to one regardless of the degree of leniency.

However, the hypotheses above seem to be too tight and extreme. One may expect that the larger the number of colluding members, the

⁷ In the reward case, α is set equal to 0.6 for two-person cases and 0.1 for seven-person cases so that the maximum reward for an individual firm is equal in the two-person and seven-person cases. A player can get a reward of at most 24 points in the seven-person case (=0.1 × 40 × 6/1), when the six other cartel members decided not to report.

⁸ When the fine is partially reduced ($R=5$), All players never reporting is a risk-dominant equilibrium as well. However, when the fine is fully reduced and even a reward is given to a reporter, the equilibrium is no longer risk dominant according to our parameter settings.

⁹ However, we can imagine a counter hypothesis to Hypothesis 3. The deviation from the collusion could be accelerated if only the first reporter can get a reduced fine or a reward because each player may rush to get them before the others can. The more uncertain subjects feel about other people's rationality, the more this phenomenon would be observed.

Table 2
Treatment details

Without leniency							
Group size	Session date	Location					# of subjects
2	2005/6/15	Kyoto					26
7	2005/6/18	Kyoto					28
With leniency							
Group size	Session date	Location	# of subjects	Leniency type	Treatment order		
					1st	2nd	
2	2004/05/19	Kyoto	28	Partial	All	One	
7	2004/05/22	Kyoto	28	Partial	All	One	
7	2004/10/23	Kyoto	28	Partial	All	One	
7	2004/10/27	Kyoto	28	Partial	All	One	
2	2007/04/18	Kyoto	26	Full	All	One	
2	2007/04/21	Kyoto	20	Full	One	All	
7	2007/07/11	Kyoto	28	Full	All	One	
7	2007/07/14	Kyoto	28	Full	One	All	
2	2005/06/16	Hakodate	20	Reward	All	One	
7	2005/06/17	Hakodate	28	Reward	All	One	
7	2005/06/17	Hakodate	28	Reward	All	One	
2	2007/07/20	Hakodate	28	Reward	All	One	
7	2007/07/20	Hakodate	28	Reward	All	One	
7	2007/09/13	Hakodate	28	Reward	One	All	
2	2007/09/14	Hakodate	28	Reward	One	All	
			Total			456	

larger the probability that at least one member of the group will deviate from the collusion under a leniency program (even if such a probability for each member is small). The equilibrium prediction above is based on the assumption that players can calculate the expected utility of each strategy correctly (without any bias), and they would follow the same logic to select the not-reporting equilibrium as the most plausible one. However, this assumption is not guaranteed in the laboratory.

We have a conjecture that if subjects believe that the other subjects are risk averse (too afraid of the prospect of loss in the case that their partner(s) cheat on them), they would not count perfectly on the idea that every other subject would focus on the not-reporting equilibrium anymore. Therefore, one may conclude that such a simultaneous coordination toward the not-reporting equilibrium (without communication) would be unlikely, especially when a group size is large.

Suppose a group consists of n members and each player anticipates that they are matched with a player who chooses the not-reporting strategy with probability γ ($0 < \gamma < 1$), where γ represents the degree of trust among players, and that they are matched with the other type of a player who chooses the reporting strategy with probability $1 - \gamma$. Then, with probability γ^{n-1} , a player who chooses the not-reporting strategy will face the situation in which all the other players also choose the not-reporting strategy and can maintain the cartel. If at least one player deviates from the not-reporting strategy, this will occur with probability $1 - \gamma^{n-1}$. In this case, the player who chooses the not-reporting strategy should pay F and he can no longer form a cartel. Then, the expected payoff of that player for choosing the not-reporting strategy becomes,

$$\pi'_{NR} = \frac{1}{1 - \gamma^{n-1}(1-p)\delta} \left[\{\gamma^{n-1}p + (1 - \gamma^{n-1})\} \left(\pi_C - F + \frac{\delta\pi_D}{1-\delta} \right) + \gamma^{n-1}(1-p)\pi_C \right] \quad (4)$$

This is a decreasing function of n since $0 < \delta, \gamma < 1$ and $\pi_D < \pi_C$ in our parameter settings. That is, the larger the number of players involved in the game, the less incentive the player has for choosing the not-reporting strategy. To be more specific, $\gamma^{n-1} > 0.74786$ is a necessary and sufficient condition for the not-reporting strategy to be the best response since $\pi_R = 115$ and $\pi'_{NR} = \frac{80 - 36\gamma^{n-1}}{1 - 0.72\gamma^{n-1}}$ according to our parameter

settings and Eqs. (2) and (4).¹⁰ Given a large enough γ , namely, a subject's belief about the other subjects' behavior is close to the one in the equilibrium, the not-reporting strategy is still the best response with respect to the player's non-equilibrium belief γ . In other words, γ has to become higher as the group size n becomes bigger to satisfy the condition $\gamma^{n-1} > 0.74786$. This means that members of a large size cartel must trust other members more strongly than in a smaller size cartel, if they have an incentive to maintain collusion. Therefore, we raise the following behavioral hypothesis.

Hypothesis 5. In the 7-person case, there are fewer groups which manage to keep collusion than in the 2-person case.

Based on the theoretical model and these hypotheses, we conducted a series of experiments. The details of the experiments are explained in the next section.

3. Experimental design and procedure

Experiments were conducted at Kyoto Sangyo University and Future University-Hakodate in 2004, 2005, and 2007. Subjects were recruited from among various majors. At Kyoto Sangyo University, subjects were recruited from the economics, business, law, foreign languages, cultural studies, engineering, and science departments. All subjects from Future University-Hakodate were computer science majors. We ran 17 sessions in total. Table 2 summarizes all the session details.

There are two treatments without a leniency program (NO LENIENCY, hereafter). We ran 2-person group and 7-person group sessions for NO LENIENCY. In addition to these base treatments, there were 12 different kinds of treatments with leniency programs. They differ depending on three control variables (group size, fine schedule (leniency for all reporters or leniency for the first reporter only), and the degree of leniency (partial reduction of penalty, full reduction of penalty, or rewarding the reporter(s)). We call a treatment in which leniency is given to all deviators ALL, and a treatment in which leniency is given to only the first deviator ONE. Concerning the degree of leniency, we call the treatment with partial reduction of fine,

¹⁰ When the reward is introduced, the condition becomes stricter and γ has to be higher than approximately 0.94562 according to Eq. (3).

Table 3
The number of rounds in each session

Without leniency										
Date	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5
2005/6/15	15	4	1	7	4					
2005/6/18	15	4	1	7	4					
With leniency										
Date	All					One				
	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 4	Trial 5
2004/05/19	1	6	5	7	3	8	10	3	1	4
2004/05/22	15	4	1	7	4	2	3	3	8	4
2004/10/23	5	4	5	2	6	4	4	2	2	4
2004/10/27	1	2	7	4	1	9	3	7	7	10
2007/04/18	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2007/04/21	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2007/07/11	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2007/07/14	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2005/06/16	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2005/06/17	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2005/06/17	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2007/07/20	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2007/07/20	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2007/09/13	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4
2007/09/14	1	6	5	7	3	8	6	3	1	4

PARTIAL, the treatment with full reduction of fine, FULL, and the treatment with reward, REWARD.

17 sessions were run in total. The experimental procedures were programmed and conducted on z-Tree (Fischbacher, 1999) with computers with a network connection.

Except for the sessions for NO LENIENCY, each session consisted of two treatments in sequence and included some sort of leniency program. In most of those sessions, the first treatment was ALL, and the second treatment was ONE. To see the order effect, we reversed the treatment order for some FULL and REWARD sessions (see Table 2). In each treatment, subjects played with the same partner(s) for five trials in sequence.

To make our subjects understand that sustaining a cartel is the most profitable for them, they experienced the mutually cooperative outcome through a prisoners' dilemma game before the real experiment started. In this practice treatment, they could choose only cooperation for four to eight rounds.¹¹ In addition to that, subjects practiced clicking their mouses according to the experimenter's directions to get used to how to manipulate the computers and how to understand the information shown on the screen for their decision making. They were not allowed to make any free decisions until the actual round started.

At the beginning of all treatments, each subject is asked to make a decision for Stage 1. There are two radio buttons (A or B) on the screen (see Appendix). A means collusion and B means defection. Subjects are restricted to choosing A. All subjects were restricted to colluding in Stage 1 in all treatments since we intentionally wanted to create a situation in which subjects committed to colluding with each other from the beginning.¹² When all group members choose A, the computer screens in each booth shows the result of Stage 1 confirming that other member(s) of his or her group also chose A. Upon knowing that everybody in his or her group committed to colluding, they move on to Stage 2 to decide whether to deviate from the cartel. They see the computer screen asking to click one of two radio buttons, C or D. C means not to deviate (i.e. not to report) and D means to deviate (i.e. report). In other words, subjects know that when they choose C (and

do not draw a payoff reduction lottery (=investigated by the AA with the probability of 0.1)), they can receive 40 points each. If they happen to draw a payoff reduction lottery, however, they get nothing for the round.

When at least one of them chooses D, on the other hand, all the people who chose D can receive leniency (in ALL treatments), the other member(s) get nothing for that round, and the group can never go back to choosing A in Stage 1 in later rounds. (In the ONE treatment, only the first subject to choose D can receive leniency for that round, while all the others get nothing. In the NO LENIENCY treatment, even if a subject chose D in Stage 1, there is no leniency for him or her.) In the case in which at least one member of the group chose D in Stage 2, all the members of the group are forced to choose B in later rounds, which means they get only 20 points per round until the end of the trial. This also happens in the case of drawing a payoff reduction lottery. When all the members of a group have finished making a decision for Stage 2, they see the result of Stage 2.¹³

At the end of each round, individual decisions of intra-group members were revealed to each player, plus whether the collusion activity in their group (choosing A in Stage 1) was found by the AA or not. Subjects could tell who deviated (chose D in Stage 2) at the end of a round. However, the identities of subjects and where they sat were kept confidential to guarantee anonymity among subjects.¹⁴ If everybody in the group chose C and the group was lucky not to get a payoff reduction lottery, then they go back to the screen for Stage 1 to continue the guaranteed collusion again (choose A again), and can move on to Stage 2. However, if the group members chose C in Stage 2, and they got a payoff reduction lottery, then all the members get nothing (paying the full fine (=40)). They will then be restricted to choosing B in Stage 2 in the subsequent rounds as long as the session is continued (=with the probability of 0.8). There will be no decision making for Stage 2 since their collusion had been dissolved.

In addition to the fine schedule (ONE or ALL), there are three degrees of leniency. When the fine schedule is ONE, only the first

¹¹ This practice treatment was not run in NO LENIENCY since in these treatments it is very easy to understand that maintaining the collusion is the most profitable. In the Hakodate sessions, the number of practice rounds was limited to four because of time constraints.

¹² The reason why we did this is explained in footnote 6 in Section 1.

¹³ We did not tell subjects that the experiment was about anti-cartel policy. Instead of telling them that a cartel formation of their group was discovered by the AA, we simply told them that their group had drawn a payoff reduction lottery. We did not use any terms such as cooperation, defection, reporting and not reporting, but more neutral terms, such as choosing A (=collude) or B (=not collude) in the first stage (although subjects could choose only A), and choosing C (=not report) or D (=report) in the second stage.

¹⁴ Subjects distinguished other subjects in their groups by a number ID.

Table 4
The average ratio of collusive groups at the first round of each trial

Without leniency													
Group size		Trial 1		Trial 2		Trial 3		Trial 4		Trial 5		Mean	
2		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00	
7		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00	
With leniency													
Group size	Leniency type	Trial 1		Trial 2		Trial 3		Trial 4		Trial 5		Mean	
		All	One	All	One	All	One	All	One	All	One	All	One
2	Partial	0.71	0.86	0.86	0.93	0.86	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.86	0.91
7	Partial	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.08	0.17	0.17	0.17	0.08	0.17	0.13
2	Full	0.91	0.91	0.91	0.96	0.96	0.91	0.96	0.96	0.91	0.87	0.93	0.92
7	Full	0.13	0.25	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15
2	Reward	0.74	0.63	0.71	0.68	0.66	0.66	0.66	0.63	0.63	0.66	0.68	0.65
7	Reward	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

Table 5
The average rate of collusive groups at the last round of each trial

Without leniency													
Group size		Trial 1		Trial 2		Trial 3		Trial 4		Trial 5		Mean	
2		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00	
7		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00		1.00	
With leniency													
Group size	Leniency type	Trial 1		Trial 2		Trial 3		Trial 4		Trial 5		Mean	
		All	One	All	One	All	One	All	One	All	One	All	One
2	Partial	0.71	0.71	0.79	0.79	0.71	0.93	0.79	0.93	0.93	0.93	0.79	0.86
7	Partial	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.08	0.17	0.08	0.17	0.08	0.17	0.12
2	Full	0.91	0.87	0.83	0.96	0.87	0.87	0.87	0.96	0.87	0.83	0.87	0.90
7	Full	0.13	0.25	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15
2	Reward	0.74	0.37	0.42	0.47	0.42	0.55	0.29	0.63	0.45	0.39	0.46	0.48
7	Reward	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06

member who chose D can receive leniency or a reward (in PARTIAL, the exemption is 35; in FULL, the exemption is 40; in REWARD, the exemption is 40 or more, depending on the number of members who defected in Stage 2).

The game depicted in Fig. 1 explains the above procedure for the 2 person case with PARTIAL, as an example. The game was repeated with a probability of 0.8 within each trial.¹⁵ Within each trial, the number of repetitive rounds was not known beforehand. In all treatments, each group was investigated by the AA with the probability of 0.1. The number of rounds in each trial for each session is shown in detail in Table 3.¹⁶

No subject participated in more than one session. Subjects were randomly assigned to a booth with partitions in front and on both sides of the desk in the laboratories. It was impossible for them to make direct contact, i.e., by talking or making eye contact, with other subjects during sessions. The instructor distributed written instructions to the subjects and read them aloud to make all the parameters and rules of the experiment common knowledge among subjects. The instructions for the case of ALL (2-person treatment, PARTIAL) are provided in the Appendix.

At the beginning of each session, subjects were told that they were going to experience two treatments (ONE and ALL) and only one of the results of the treatments would be paid by choosing one of them by

lottery at the end of the course of the treatments.¹⁷ The experimenter read the instructions for each treatment at the beginning of each treatment, so subjects were not aware of the details of each treatment until just before the treatment began. Therefore, there was no incentive for subjects to sacrifice their profits in one treatment in order to make higher profits in a later treatment.

We did not allow subjects to have any communication before making their decisions. When cartel members decide whether to apply for the leniency program, they make the decision secretly from other cartel members. Therefore, we simply made subjects make their decisions without communication.

All sessions lasted about 2 h. Subjects were paid individually in cash according to their experimental results. During the experiments, subjects' earnings were represented by points. They were told in the instructions that one point would be exchanged for five yen at the end of the experiment. The average payment for subjects in the two-person group experiment was 5014 yen (about 43 US dollars, \$1=116 yen), and the average payment in the seven-person group experiment was 3232 yen (about 29 US dollars).¹⁸

4. Results

4.1. Group-level analysis

Tables 4–5 summarize the average ratio of collusive groups in all treatments for the first rounds and the last rounds respectively.

¹⁵ The first round was realized with certainty.

¹⁶ We ran sessions for PARTIAL using a random stopping rule, so that the computer terminated each trial with the probability of 0.2. However, we realized that this would make the data unbalanced. Therefore, we ran sessions for FULL and REWARD with the same number of rounds in each trial, eliminating the random stopping rule. We set the number of rounds to equal those chosen by computer in PARTIAL sessions. We had to set the composition of rounds differently between ONE and ALL so that each subject could not guess the length of a trial in the second treatment.

¹⁷ Subjects were paid for the 8-round practice treatment (see footnote 7) as a show-up fee in all the treatments except for NO LENIENCY sessions. The treatments for NO LENIENCY were actually run first before 2 or 3 other kinds of treatments (which are not explained in this paper). Subjects in these treatments were paid for the results by chance (lottery).

¹⁸ The calculation of the average payments includes a show-up fee (=800 yen).

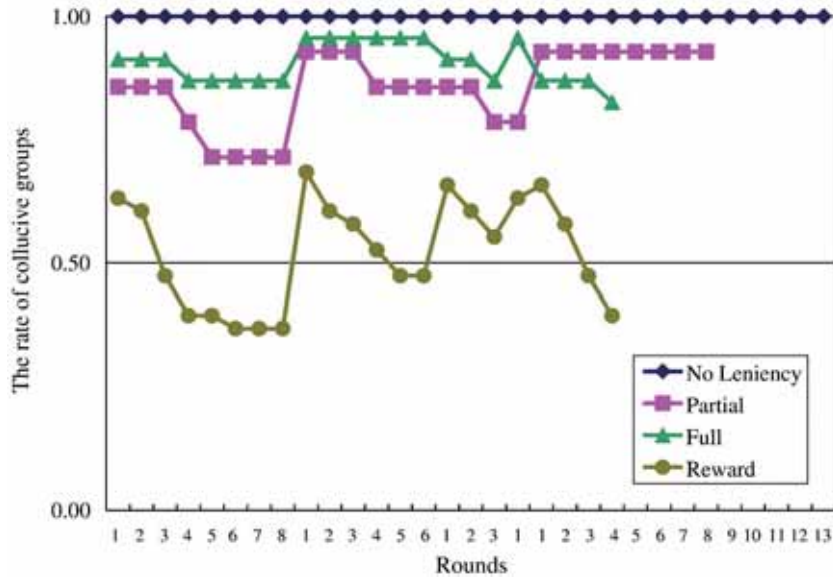


Fig. 2. The average rate of collusive groups (group size: 2-person; leniency is given to only the first deviator).

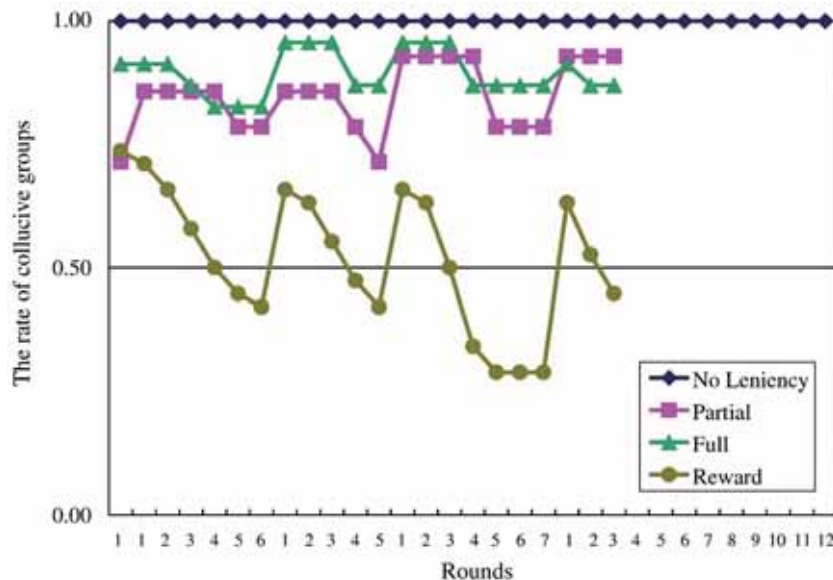


Fig. 3. The average rate of collusive groups (group size: 2-person; leniency is given to all deviators).

Figs. 2–5 show the time series data for the average ratio of collusive groups which sustained collusion during the treatments. They are (2-person, ONE), (2-person, ALL), (7-person, ONE), and (7-person, ALL) respectively. The figures compare the impact of the degree of leniency programs among NO LENIENCY, PARTIAL, FULL, and REWARD. The graphs depict only the ratio of groups which did not dissolve their cartels voluntarily, including the case in which none of the members of a group defected in Stage 2 but happened to get a payoff reduction lottery.¹⁹

Each graph includes a line representing NO LENIENCY as the benchmark case. This line shows that no one was willing to dissolve cartels in both the 2-person case and the 7-person case. This indicates that subjects understood that there is no incentive to dissolve cartels in the treatment. The result implies that members of hardcore cartels,

¹⁹ Because of the experiment design, once a group unluckily got a payoff reduction lottery (with the probability of 0.1), they were forced not to collude in later rounds. We simply assumed that those groups would have kept colluding if they were lucky.

who do not doubt about their group members collusion, do not break up their cartels voluntarily when there is no leniency program (and when the frequency of the authority's monitoring is low).

2-person treatment results (Figs. 2 and 3) show that the impact of leniency programs varies among PARTIAL, FULL, and REWARD. In most of the rounds, more than 50% of the groups tried to maintain their cartel in those treatments. The results also show that the impact of PARTIAL and FULL do not seem significantly different, while REWARD seems to promote more players to dissolve cartels voluntarily than PARTIAL and FULL as the experiments proceeded. 7-person treatment results (Figs. 4 and 5) show that most groups rarely managed to maintain cartels in all the treatments with leniency. The result indicates obviously that Hypothesis 1 is rejected.

To verify these observations and evaluate the hypotheses described in Section 2, we estimated a random effects logistic regression model using the data of PARTIAL, FULL, and REWARD. Whereas in Tables 4–5 and Figs. 2–5 we focus on the degree of successful collusion, in the following discussion we focus on the degree of cartel dissolution as the

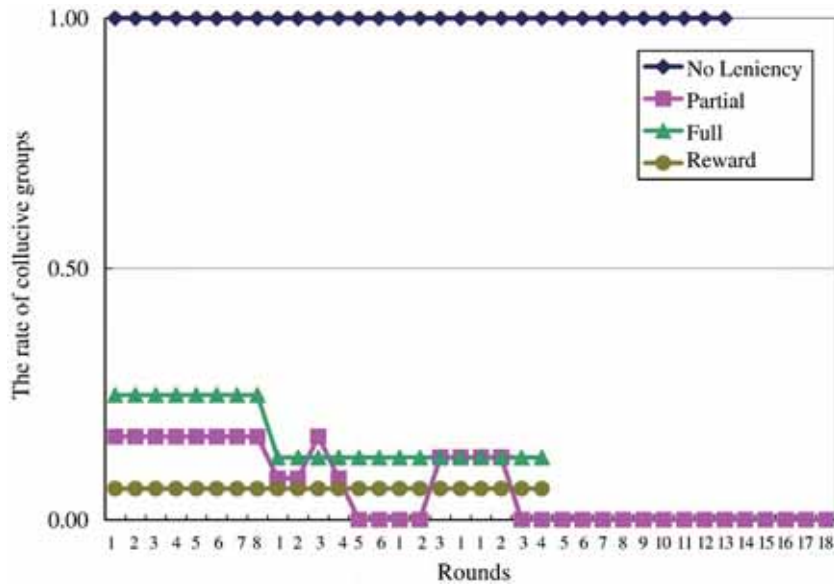


Fig. 4. The average rate of collusive groups (group size: 7-person; leniency is given to the only the first deviator).

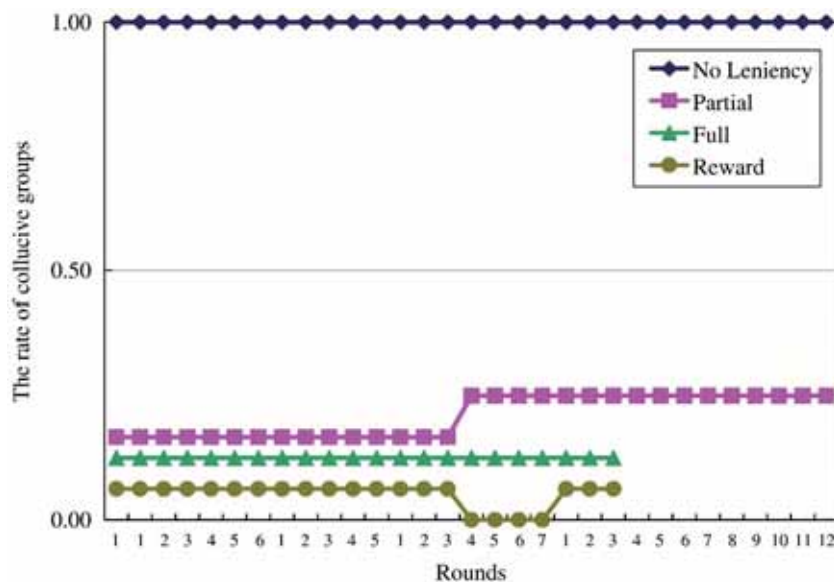


Fig. 5. The average rate of collusive groups (group size: 7-person; leniency is given to all deviators).

dependent variable. The estimations were performed using Stata (version 8).

$$\Pr(R = 1) = G[\beta_0 + \beta_1 \text{ONEorALL}_{it} + \beta_2 \text{Groupsize}_i + \beta_3 \text{Round}_t + \beta_4 1\text{stround}_t + \beta_5 \text{Order}_t + \beta_6 \text{FULL}_i + \beta_7 \text{REWARD}_i + \text{Groupsize}_i(\beta_8 \text{ONEorALL}_{it} + \beta_9 \text{FULL}_i + \beta_{10} \text{REWARD}_i) + \varepsilon_i + u_{it}] \quad (5)$$

G is the logistic cumulative distribution function. The estimated coefficients and other statistical information are shown in Table 6. In the above equation, i denotes the group and t denotes the round. Since subjects could interact with other subjects within their group, we employed group-level data in the analysis. R is a response variable that equals 1 when a cartel was dissolved voluntarily and 0 if the cartel was not dissolved voluntarily.

The variable ONEorALL_{it} is a dummy variable, which equals 1 for ALL and 0 for ONE; it changes across i and t . The variable Groupsize_i is also a dummy variable, which is 1 for the seven-person group and 0

for the two-person group; it changes across i , but does not change across t , which is why it has no t subscript. The variable Round_t consists of $\{1, 2, \dots, 16\}$. The variable 1st_round_t is a dummy variable that equals 1 when $t=1$ and 0 otherwise; it does not change across i , which is why it has no i subscript. The dummy variable Order_t is a dummy variable which equals 1 when $t=1, 2, \dots, 8$ (rounds for the first treatment) and 0 when $t=9, 10, \dots, 16$ (rounds for the second treatment); it does not change across i . The variable FULL_i is a dummy variable which equals 1 for FULL and 0 for PARTIAL and REWARD; it does not change across t , which is why it has no t subscript. The variable REWARD_i is a dummy variable which equals 1 for REWARD and 0 for PARTIAL and FULL; it does not have t subscript by the same reason for FULL_i . Since group size was the same during each session, it can interact with ONEorALL_{it} , FULL_i , REWARD_i . The term with Groupsize_i in the brackets contains the interaction terms of those variables. We assume that the unobserved group heterogeneity effect ε_i is independent of all explanatory variables in all rounds.

Table 6
Random effects logistic regression on cartel dissolution using group data

Dependent variable: cartel dissolution (if a group dissolved its cartel=1,otherwise=0)				
Number of observations=1776, Number of groups=111				
Group variable: group				
Log likelihood=-327.37				
Independent variables	Coefficient	Std. err.	z	P>|z|
Constant	-1.32	0.88	-1.49	0.14
ONEorALL _{it}	0.29	0.28	1.06	0.29
Groupsize _i	4.28	0.75	5.69	0.00
Round _t	0.03	0.06	0.45	0.65
1st_round _t	-1.78	0.28	-6.31	0.00
Order _t	-0.35	0.52	-0.67	0.50
FULL _i	-0.84	0.62	-1.36	0.17
REWARD _i	2.67	0.47	5.63	0.00
Groupsize _i ×ONEorALL _{it}	-0.69	0.77	-0.90	0.37
Groupsize _i ×FULL _i	5.26	1.28	4.11	0.00
Groupsize _i ×REWARD _i	3.22	1.26	2.56	0.01

Note:
ONEorALL_{it}: if the only first deviator is given leniency=0; if all deviators are given leniency=1.
Groupsize_i: two-person group=0, seven-person group=1.
Round_t: Round index consisting of {1, 2,..., 16}.
1st_round_t: a dummy variable that equals 1 when t=1 and 0 otherwise.
Order_t: the treatment which was run first=1, the treatment run next=0.
FULL_i: treatment with full leniency=1, otherwise=0.
REWARD_i: treatment with reward=1, otherwise=0.

Therefore, we employed the random effects model.²⁰ The error u_{it} is the idiosyncratic (time-varying) error.

Round_t consists of {1,2,..., 16} in sequence. There are more than 16 rounds in total in each session (see Table 3). The reason why we did not use the data from all of the rounds is that the data after a group's cartel was dissolved was fixed automatically as either “dissolved” or “not dissolved” in our analysis. For example, if at least one member of a group defected in Stage 2 (=their collusion was dissolved voluntarily), they could never go back to colluding in Stage 1 (by choosing A), but had to choose not to collude (by choosing B) in later rounds. The status of such a group was set as “dissolved” until the trial ended. On the other hand, suppose that none of the members of a group defected in Stage 2, but got a payoff reduction lottery during some round. In this case also, they could never go back to colluding in Stage 1 (by choosing A), but had to choose not to collude (by choosing B) in later rounds. The status of such a group was set as “not dissolved” until the trial ended. We counted this case as “not dissolved” for analysis since they could have maintained collusion if they had been lucky. Since the status of the group was set as “not dissolved” artificially, we wanted to avoid counting the data of the later rounds as real action by subjects.

Originally we wanted to choose the first and last rounds of each trial for analysis. However, some trials have only one round; therefore, we simply could not choose two rounds from each trial. To compare ONE and ALL fairly, we established the following set of rules for analysis:

1. Use the data of the first round from each trial in each session
2. Select the data of one more round which represents the final outcome of each trial.
3. The additional round has to be common to both ONE and ALL for fair comparison.
4. If there is only one round in a trial in either ONE or ALL, compare only the first rounds for the trial.

²⁰ We also ran the fixed effects model, and the results were consistent with those of the random effects model for the variables we were able to compare (i.e. ONEorALL_{it}, Round_t, 1st_round_t, Order_t, and Groupsize_i×ONEorALL_{it}, which are all time-varying variables).

Following the above rules, we chose the data from sixteen particular rounds, which were the first round and the round as close to the last round that was common to both ONE and ALL. For example, in trial 2, ONE lasted 10 rounds, but ALL was terminated at round 6. Therefore, the sixth round is the round that is closest to the last round and common to both treatments. The rounds chosen for analysis are: for both ONE and ALL, the first round from trial 1, the first and the sixth rounds from trial 2, the first and the third rounds from trial 3, the first round from trial 4, and the first and the third rounds from trial 5.

The reason why we did not use all the data is that there are two possible factors that may mislead the statistical results, if we were to do so. One is that each trial has a different number of rounds because the number of rounds is determined probabilistically, i.e., they depend on the probability δ . For example, most sessions of ALL have only one round in trial 1. On the other hand, most sessions of ONE have 8 rounds in trial 1. For comparison, the data of the first round is the only fair candidate to compare the data between ALL and ONE. There is not enough data to know how subjects would have behaved if trial 1 had lasted 8 rounds in ALL sessions. Therefore, we chose the data for the first round of each trial since all sessions of all treatments have data for the first round. The second reason is that we also wanted to analyze data from rounds other than the first round. It is important to capture the characteristics of each treatment regarding how many groups ended up dissolving their collusion by the end of each trial. However, we should not simply compare the result of the last round of each trial. The longer a trial lasted, the more subjects were able to interact with each other. If we simply compared the results of the last round, a treatment which has more rounds in a trial might be evaluated as having more groups that dissolved the collusions. This comparison is not fair. Therefore, we chose the data of round 6 for trial 2, round 3 for trial 3, and round 3 for trial 5. (Since both ALL and ONE had only one round for trial 1 and trial 4, we compared the data of only the first round for those trials.)²¹

From Table 6, one can see that the coefficient of Groupsize_i is significantly positive, which indicates that the rate of cartel dissolution is significantly higher in the 7-person case than in the 2-person case.²² Hence, Hypothesis 2 is rejected, and Hypothesis 5 is accepted. The coefficient for ONEorALL_{it} is not significant, which means that the fine schedule does not have a strong impact on people's behavior under our experimental parameters. Hence, Hypothesis 3 is accepted. From this result, we can conclude that limiting the number of firms which can enjoy the leniency program does not have a significant impact on the ability of collusive firms to maintain their collusion. The coefficient for 1st_round_t is significantly negative, which indicates that even if groups dissolved their cartels in the previous trial they recovered their cartels in the new round of the next trial (see Figs. 2–5). That is, there existed cartel recidivism even when a leniency program was introduced. The coefficient for FULL_i is insignificant, which means that the impact of leniency programs does not differ between the partial leniency and the full leniency treatments. On the other hand, the coefficient for Reward_i is significantly positive, which indicates that positive enforcement

²¹ However, there are some exceptions. We selected 16 rounds from each session so that the data would be balanced compared to the other treatments. In the sessions for 7-person with Partial leniency (run on 5/22, 10/23, and 10/27 in 2004), the number of rounds varied across sessions (see Table 3). None of these sessions had 6th rounds in trial 2, so we had to choose rounds approximately equivalent to the other treatments. We selected the rounds {(1), (1,4), (1),(1,3),(1,3)} for ALL, {(1), (1,3), (1,3),(1), (1,3)} for ONE for the 5/22 session, {(1),(1,4),(1,3),(1),(1,3)} for ALL, {(1),(1,4),(1,2),(1),(1,3)} for ONE for the 10/23 session, and {(1),(1,2),(1,3),(1,3),(1)} for ALL, {(1),(1,3),(1,3),(1),(1,3)} for ONE for the 10/27 session.

²² Although some coefficients for the interaction terms are significant, they do not reflect the characteristics of their marginal effects on cartel dissolution sufficiently. The software package we used (Stata) does give outputs on coefficients, but we should be careful about how to interpret them because they do not mean the marginal effects of the interaction terms in terms of both their signs and their magnitudes. See Ai and Norton (2003) for more on the correct interpretation of coefficients of interaction terms.

such as giving a reward for a self-reporting firm in a courageous leniency program has a great impact on dissolving cartel activities.²³ Thus, Hypothesis 4 is rejected. The coefficient for Round is not significant. Subjects could have gained enough experience and could have become familiar with our experimental environment as trials proceeded. After eliminating the first round effect, however, there was no significant tendency for the number of cartels to change as time proceeded. The coefficient for Order_t was also not significant, which implies that the treatment order does not significantly affect the subjects' behavior.²⁴

The main results of our experiments are summarized below.

Result 1: Leniency programs are useful to deter cartels even if they are not theoretically strict enough to eliminate the collusive equilibrium. This tendency is more salient in the case of a large cartel group than in the case of a small cartel group.

Result 2: The not-reporting strategy was observed more frequently in the two-person case than in the seven-person case.

Result 3: The rate of cartel dissolution was not significantly different between the case in which only the first reporter can use the leniency program and the case in which all reporters are allowed to use the program.

Result 4: The frequency of collusion dissolution is significantly higher when the courageous leniency program, which gives rewards, is used.

Having seen that rewarding reporters has a strong impact on deterring cartels, we next estimate the change in the predicted probability as it goes from Reward_i=0 to Reward_i=1 by

$$G[\bar{X}\hat{B} + \hat{\beta}_{\text{REWARD}} + \hat{\beta}_{\text{GROUPSIZE*REWARD}}] - G[\bar{X}\hat{B}]. \quad (6)$$

\bar{X} is the vector of the average values for other variables, and \hat{B} is the vector of their estimated coefficients in Table 6. \hat{B}_{REWARD} and $\hat{B}_{\text{GROUPSIZE*REWARD}}$ are the estimated coefficients for REWARD_i and Groupsize_i×REWARD_i in Table 6, corresponding to \hat{B}_7 and \hat{B}_{10} in Eq. (5) respectively. The effect of reward was approximately 0.6423 (standard error=0.057, $p<0.001$). Therefore, about 64% more cartels were dissolved by the leniency program with reward than the average level of other leniency programs without it in our experimental setting.²⁵

4.2. Individual level analysis

By looking only at group-level data, we might have neglected some significant effect of leniency programs at the individual level. In addition, the insignificance of the effect of the fine schedule (ONE and ALL) may be due to individual subject social background characteristics (e.g., gender).

To see how robust the statistical result using group data is, we also analyzed individual level data including the gender information about each subject. Although most of the individual data is not independent since subjects interact with each other in the course of the experiments, we can use the data for the first rounds, before subjects interact. Strictly speaking, even the data of the first rounds in trials 2–5 are not independent, since subjects made decisions under the influence of the result of trial 1. However, Figs. 2–5 show that subjects

²³ We also compared FULL and REWARD separately. Significantly more cartels were voluntarily dissolved in REWARD than FULL ($p<0.01$).

²⁴ This result justifies combining the data from sessions in which ALL was run first and sessions in which ONE was run first.

²⁵ The probability of the change could differ depending on which point we evaluate it from, and what kind of cumulative distribution function is employed. Although we can modestly say that a leniency program with reward has a great impact on cartel dissolution, the magnitude of this estimated probability should not be overstated.

Table 7
Random effects logistic regression on cartel dissolution using individual data at the first round with social background (gender)

Dependent variable: cartel dissolution (if a subject chose D=1, otherwise=0)				
Number of observations=3260, Number of subject=326				
Group variable: subject				
Log likelihood=-1125.99				
Independent variables	Coefficient	Std. err.	z	P>|z|
Constant	-11.97	0.82	-14.53	0.00
ONEorALL _{it}	0.29	0.29	0.98	0.33
Groupsize _i	5.96	0.64	9.24	0.00
Trial _t	0.80	0.05	15.26	0.00
Order _t	2.60	0.27	9.55	0.00
Gender _i	-0.75	0.30	-2.54	0.01
FULL _i	-0.80	0.87	-0.92	0.36
REWARD _i	3.37	0.58	5.85	0.00
Groupsize _i ×ONEorALL _{it}	0.89	0.32	2.73	0.01
Groupsize _i ×FULL _i	2.80	0.95	2.93	0.00
Groupsize _i ×REWARD _i	-3.10	0.65	-4.78	0.00

Note:
ONEorALL_{it}: if the only first deviator is given leniency=0; if all deviators are given leniency=1.
Groupsize_i: two-person group=0, seven-person group=1.
Trial_t: Trial index consisting of {1, 2, ..., 10}.
Order_t: the treatment which was run first=1, the treatment run next=0.
Gender_i: female=0; male=1.
FULL_i: treatment with full leniency=1, otherwise=0.
REWARD_i: treatment with reward=1, otherwise=0.

seem to reset the result of the previous trial and recover their collusions in the first round of each trial. Therefore, we used the data of the first round of all the five trials. We employed the following random effects logistic regression model using the individual data of the first rounds among PARTIAL, FULL, and REWARD.²⁶

$$\Pr(R = 1) = H[\beta_0 + \beta_1 \text{ONEorALL}_{it} + \beta_2 \text{Groupsize}_i + \beta_3 \text{Trial}_t + \beta_4 \text{Order}_t + \beta_5 \text{Gender}_i + \beta_6 \text{FULL}_i + \beta_7 \text{REWARD}_i + \beta_8 \text{ONEorALL}_{it} + \beta_9 \text{FULL}_i + \beta_{10} \text{REWARD}_i] + \varepsilon_i + u_{it}. \quad (7)$$

Similar to Eq. (5), H is the logistic cumulative distribution function. The estimated coefficients and other statistical information are shown in Table 7. In the above equation, i denotes the subject and t denotes the trial. R is a response variable that equals 1 when a subject dissolved their cartel voluntarily (by choosing D) and 0 if a subject did not dissolve the cartel voluntarily (by choosing C) in the first rounds.

The meanings of most explanatory variables are similar to those in Eq. (5). The variable Trial_t consists of {1, 2, ..., 10}. Since subjects went through 10 trials till the end of the session (5 trials each of ONE and ALL), there are 10 samples of the first rounds for each subject. The variable Order_t is a dummy variable which equals 1 when $t=1, 2, \dots, 5$ (the five first rounds for the first treatment) and 0 when $t=6, 7, \dots, 10$ (the five first rounds for the next treatment). The variable Gender_i is a dummy variable which equals 1 if a subject is male and 0 if a subject is female. We assume that the unobserved subject heterogeneity effect ε_i is independent of all explanatory variables in all trials. Therefore, we employed the random effects model. The error u_{it} is the idiosyncratic (time-varying) error.

From Table 7, one can see that the coefficients for Constant, Groupsize_i, Trial_t, Order_t, Gender_i, REWARD_i are significant ($p<0.05$). Similar to the result of the group-level data, the coefficient ONEorALL_{it} is not significant. The result means that the fine schedule does not

²⁶ We ran the fixed effects model for individual data, as well. The results were also consistent with those of the random effects model for the variables we were able to compare (i.e. ONEorALL_{it}, Trial_t, Order_t, and Groupsize_i×ONEorALL_{it}, which are all time-varying variables).

have a strong impact even at the individual level. The coefficient of Groupsize_{*i*} is significantly positive. The result indicates that the rate of applying for the leniency program is significantly higher in the 7-person case than in the 2-person case, confirming the group-level analysis. The coefficient for Trial_{*t*} is significantly positive, which indicates that subjects dissolved their cartels more voluntarily as the experiment proceeded. However, this tendency is not strong enough in the analysis for the group-level data. The coefficient for Order_{*i*} is significantly positive, which indicates that subjects dissolved cartels more in the first treatment than in the following treatment. This result implies that people would not necessarily give up colluding even if they experienced their cartels being dissolved by leniency programs before. The coefficient for Gender_{*i*} is significantly negative, which indicates that fewer men dissolved their cartels than women. The coefficient for REWARD_{*i*} is significantly positive, which is similar to the group-level analysis.²⁷ The most interesting result from the above analysis is that the effect of the fine schedule (ONEorALL_{*t*}) is still insignificant even after eliminating social background bias such as gender. That is, people do not change their behavior according to the fine schedule. The subjects' behavior is more influenced by group size and the high reward.²⁸

5. Conclusions

We studied several kinds of leniency programs through laboratory experiments. It is expected that the larger the group, the larger the probability of cartel dissolution will be. In addition, the deviation from collusion could be accelerated if only one firm is given a reduced fine. Based on the predictions above, under a simplified oligopoly market, we experimentally controlled the following three factors to compare several institutional designs of leniency programs; (1) group size: the number of members in a group, small group (two members) or large group (seven members), (2) fine schedule: only the first reporter of cartel information is given leniency, or all reporters are given leniency, and (3) degree of leniency: a partially reduced fine, a fully reduced fine, or a reward is given to self-reporting firm.

The experimental results showed that (1) the larger the number of cartel members in a group, the weaker their ability to maintain the collusion is, (2) changing the fine schedule does not have a significant impact on firms' ability to maintain collusion (limiting the number of firms which can enjoy leniency does not make people rush to dissolve their collusion by reporting), and (3) positive enforcement, such giving a reward for a self-reporting firm in a courageous leniency program, has a great impact on dissolving cartel activities. That is, Spagnolo's prediction that the AA should give rewards to firms to deter cartels was proved experimentally to be correct.^{29,30}

²⁷ Although we had 112 subjects for the 7-person with REWARD treatment in total, we could collect the gender information from only 56 subjects. We did not collect the questionnaire on gender for the sessions on 2005/6/16 and the two sessions of 2005/6/17. Since we included Gender as an explanatory variable, the data which does not have the gender information is omitted.

²⁸ The sign of coefficient for Groupsize_{*i*} × REWARD_{*i*} differs between the group data analysis and the individual data analysis (Tables 6 and 7). This puzzle was pointed out by the anonymous referee. We checked this contradiction by estimating the probability change from REWARD = 0 to REWARD = 1 separately for the 2-person group data and for the 7-person group data. It confirmed that the probability change is smaller in the 7-person case, which is consistent with the results represented in Table 4 and the result for the individual data in Table 7. The puzzle may have been created because of the difference between coefficients for interaction terms and their marginal effects, which we mentioned in footnote 21.

²⁹ However, it is hard to believe that any society would be willing to introduce a system that gives criminals some reward for their confessions. Korea's leniency program gives a reward to an "external" whistle blower.

³⁰ Spagnolo (2000) stresses that the most effective leniency programs are those that give more than a full reduction to the first applicant and none to subsequent ones. Our experiment is partly in line with Spagnolo's ideas.

Comparing our results with those of Apesteguia et al. (2007) and Hinloopen and Soetevent (2008), our findings complement and share some insights with their results.

In the result of the "Bonus" treatment in Apesteguia et al. (2007), which gives rewards to defectors based on the fines collected from non-defectors as in our REWARD treatment, they found that more cartels were formed and reported in the Bonus treatment than in other treatments without rewards. In their interpretation, subjects were attracted by the possibility of reward and therefore established collusions in order to receive the reward. (There was no reward for non-colluders.) They also pointed out that their one-shot game structure precluded the possibility of subjects learning not to enter cartels in the first place. They conjectured that if the game had been repeated for more than one round, subjects might have recognized that cartels are full of cheaters and that entering a cartel is not a rational choice. This conjecture might be optimistic. Although our experiment did not give subjects the option to collude or not in the first stage (they were forced to collude), our results across trials imply that subjects might still form cartels in a repeated game setting. Similar to the results of Apesteguia et al., our results also show that rewarding drastically increases the number of reporting firms. However, in the beginning of each trial of the REWARD treatment, most groups recovered their collusion almost to the level of the first round of the previous trial. If a leniency program with rewards strongly discourages cartel members to maintain collusion with each other, we should not have observed that subjects recovered their collusion level at the beginning of later trials. This implies that to receive a high reward, a player needs to make his partner(s) to believe that he is willing to collude in the first place. And then, the player will cheat others to collect high rewards before the others cheat him. That might be why subjects maintained collusion at the beginning of each trial in the reward treatment and then rushed to defect with the aim of receiving high rewards. That is, even a leniency program with rewards may still trigger the formation of new cartels or cartel recidivism in the short term. Furthermore, subjects might even consider rotating the receiver of the reward in the repeated game setting.

Hinloopen and Soetevent's paper focused exclusively on the leniency policy that gives full immunity to the first applicant and a 50% reduction to the second applicant. Our FULL treatment with 2-person groups is the closest condition to their experimental setting. Our results seem much more collusive than theirs. There are many possible reasons for this difference since the experimental designs have many different aspects. We suspect the main reason is that their subjects had more strategies for cheating other subjects. In our experiments, subjects had only binary choices (report or not); therefore, each subject had only two extreme choices: collude or not collude. On the other hand, subjects in Hinloopen and Soetevent's experiment could choose a price from 100 to 110. Other than the competitive price (=101), any other price choice is considered somewhat collusive in their interpretation. Even if subjects agreed on a high price range, such as {103, 110}, subjects are afraid of bidding a relatively high price because they might be cheated by other players who could bid a slightly lower price. This way of thinking leads subjects to bid a low price even when they were allowed pre-play communication.

We can provide several policy implications from our experimental findings. The average size of a cartel in the real world consists of about six firms.³¹ Therefore, the seven-player case in our experiments nearly corresponds to the real-world situation. We found

³¹ Leniency programs set up in the EU in 1996 achieved some notable success in prosecuting cartels (see European Union's Official Journal Legislation (OJL), 1998/1/21-2003/12/16). The data of 31 cartels prosecuted between January 21, 1998 and December 16, 2003 demonstrates that the average number of firms forming a cartel is about six, and by applying leniency programs the fines for cartel members are reduced by 10% to 100% according to evidence brought to AA.

that under the leniency programs, most seven-member groups easily terminated their collusion, while none of the groups dissolved their cartels at all when they were not given any leniency for self-reporting. Therefore, we can predict that the leniency program could be fairly effective for regular size cartel groups in reality. However, such a power must be relatively weak when a cartel group consists of only a few members.

Motta (2004) discusses the effect of cartel group size on collusion in a different setting from the one we created through our experimental design. He argues that when a market is dominated by only a few firms and they collude with each other, the immediate gain a firm can get by deviation (e.g. lowering a price) does not expand drastically since each firm already has a significant share of the market. Therefore, the immediate gain from reporting cannot attract those firms to dissolve their collusion voluntarily since the long run gain from collusion would be much higher. However, if a market is dominated by many firms and they collude with each other, each firm is strongly tempted to deviate from collusion since a firm can gain a drastically larger profit by deviating. That is, when a market consists of many firms, the immediate gain from deviation is much higher than the long run gain because the deviating firm can potentially get the whole market share temporarily. In our experiment, the immediate gain from deviation and the long run gain from collusion do not differ in the two-person group case and the seven-person group case. However, the collusion in the latter case was rarely successful. We predict that it would be even more difficult for a large group to maintain a successful collusion in a market like the one Motta discusses.

Huck et al. (2004) analyze how the number of firms affects the level of competition in Cournot market experiments. They showed that a market with two firms can be collusive, while a market consisting of more than three firms is too competitive for the firms to form collusion. Their findings are consistent with our results.

The question of how many firms should be given a reduced fine or a reward is an issue to be discussed in policy making in many countries. In our experiments, we could not find any difference between ONE and ALL. This suggests that it might be better for the AA to give immunity only to the first reporter rather than all reporters from the viewpoint of the cost effectiveness of a public policy, since giving the immunity means a reduction in revenues from surcharges, thus increasing the cost of law enforcement. In most countries other than US, however, the immunity and/or a reduction in fines are given to more than the first reporter. One of the reasons is to increase information brought to the AA by accepting multiple reporters. This reduces investigation costs for the AA. This information aspect of a leniency program remains to be studied.

There are several possible explanations for the potential difference in the effectiveness of applying leniency only to the first reporter or to all reporters. If only the first reporter is given a reduced fine or a reward, member firms might race to get leniency before the others could do so. This intuition is also supported by researchers and the AA in the United States where only the first reporter is given maximum leniency and no leniency is given to other reporting firms.³² On the other hand, in the case of Japanese cartels, the members may hesitate to report the cartel evidence to the AA if only the first reporter would be given a reduced fine or a reward.³³ This is because a member might fear retaliation from other members in the future. As the Japanese market is smaller than that of the United States and there is a tight connection between firms, Japanese firms fear being branded as a “cheater.” On the other hand, if all the reporters were given reduced fines or a

reward, then they would less fearful of retaliation for applying for leniency since not doing so would be irrational and no one can be blamed for doing the right thing. In fact, under the Japanese leniency program, three firms can receive a reduced fine with different reduction rates, and in 2008 a new law is expected to be submitted to the Diet to expand the maximum number of eligible firms. Under the leniency program in the EU, even though its reduction rates differ, there is no restriction on the number of firms who are given a reduced fine.

We have to admit that our experiment focused on only a limited environment. Since our subjects were forced to collude in the beginning, we can not say anything about whether firms would newly form a cartel voluntarily where a leniency program is already introduced. However, we believe that the effect of leniency programs can be separated into two dimensions. One dimension is the kinds of leniency programs actually used by preexisting cartel groups. To create a situation in which firms count on their cartel partner(s) to collude with them with certainty in some illegal business activity (e.g. price fixing), we forced subjects to collude in the first stage. In addition to that, since the JFTC leniency program was just enacted in early 2006, we wanted to know what kind of leniency program would actually be effective to dissolve preexisting cartel firms. The other dimension is the kinds of leniency programs that would prevent firms from newly forming a cartel or would prevent cartel recidivism. Even if a leniency program is successful at dissolving preexisting cartels, such an effect could be temporary. The leniency program might be weak at preventing hard core cartels from reforming a cartel again. Investigation into this second dimension remains to be investigated. In addition, the effects of changing the amount of a fine and the investigation probability have not been investigated in this study. The effectiveness of a policy which rewards reporters should be investigated in terms of the magnitude of reward.

Appendix A. Instructions for Partial Leniency for ALL (2-person case)

This experiment consists of Stage 1 and Stage 2. You choose A in Stage 1. In Stage 2, you can select one of two choices, C or D. The summary of the procedure of this experiment is as follows.

- 1) Decision making in Stage 1 (Choose A)
- 2) Decision making in Stage 2 (Choose C or D)
- 3) Each group is given a lottery number. There is an unlucky lottery number, which reduces the payoffs of the members of the group. The possibility of each group drawing this lottery is 10% (therefore, your group won't get this lottery at 90% of the time.)
- 4) Your payoff of the round is decided.

We will explain how your payoff will be decided by referring to the Payoff Tree in the next page.

Stage 1

Look at the Payoff Tree on the next page. You and your partner choose A in this stage and go on to Stage 2.

Stage 2

You are **free** to choose C or D. Your payoff will be different in the following cases.

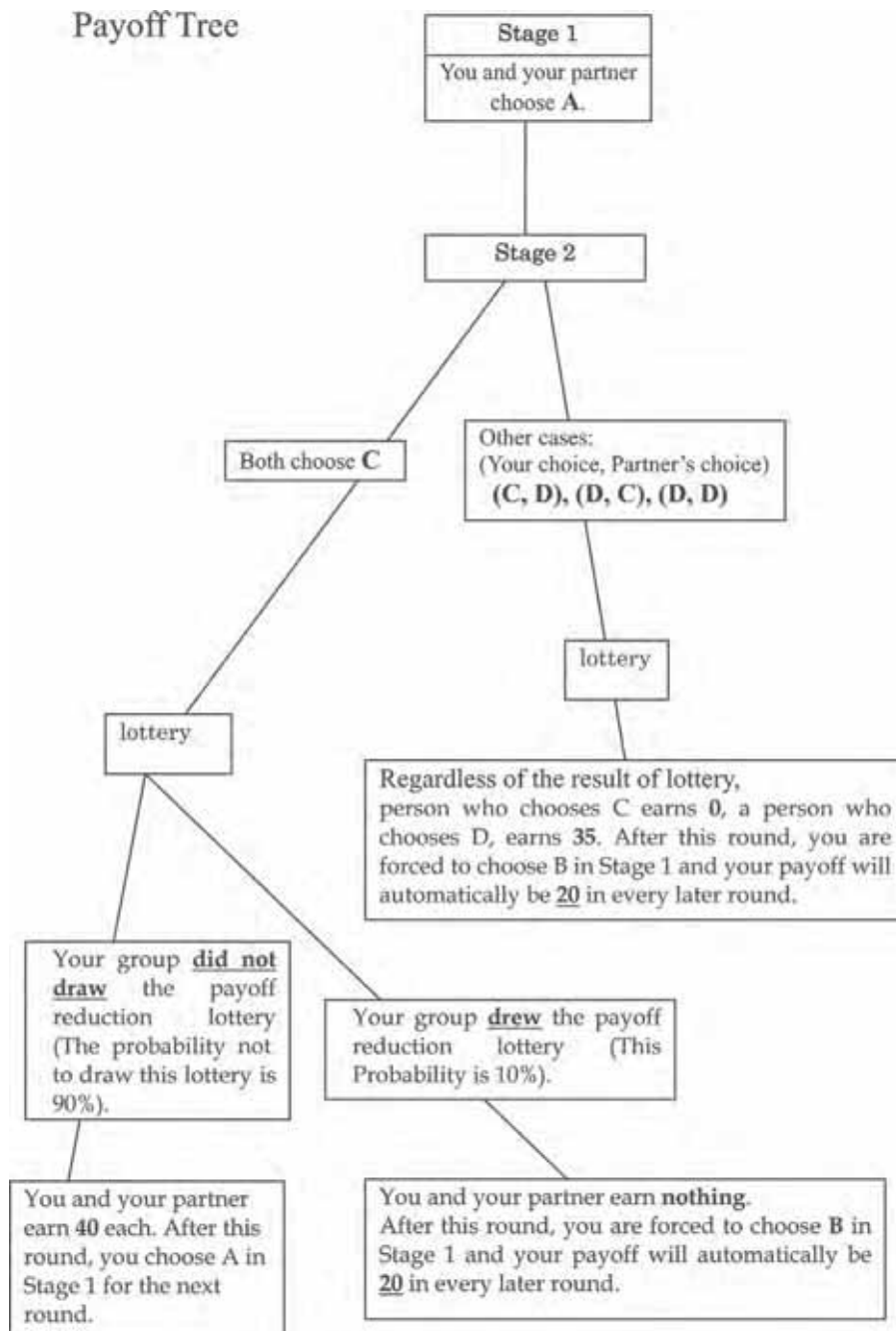
- 1) You and your partner choose C and your group did not draw the payoff reduction lottery.
- 2) You and your partner choose C and your group drew the payoff reduction lottery.
- 3) Other cases: (You choose C, Partner chooses D), (You choose D, Partner chooses C), (You choose D, Partner chooses D).

³² See Harrington (2006) and Hammond (2003).

³³ See Nippon Keidanren (2004).

In the following table, payoffs are shown in these cases.

	Case 1	Case 2	Case 3
Payoff in the round	You and your partner earn 40 points each.	You and your partner earn nothing .	Regardless of the result of lottery, a person who chose C earns 0 , a person who chose D, earns 35 .
Payoff in the later round	In the next round, you choose A in Stage 1 for the next round and make a new decision in Stage 2. The payoff will be decided similarly to this round.	After this round, you are forced to choose B in Stage 1 and your payoff will automatically be <u>20</u> in every later round.	



From the second round, whether the session is ended or not is determined by lottery. The session is continued with probability of 80%. We do not know when the session is ended beforehand. (For example, the probability that the session is repeated for 5 rounds is $(0.8)^5 \times 100$, which is about 33%.

Now we explain how to manipulate the computer. When Experiment 2 is started, you will see this kind of screen.



In the top panel, it says,

Round
1/1.

Since we do not know how long the session is repeated, this means that this is the first round. The right top panel shows how many seconds left to make a decision.

The middle panel says,

Rule of Stage 1

You are paired with somebody. Your partner will remain the same until the end of experiment. Please choose A in Stage 1. If you have anything you don't understand, please read the instructions.

In the bottom panel, the first line shows “Your ID.” This number is the same as your seat number. Please make sure whether they are the same. The next line is “**Your decision.**” On the right side, there are two choices, **A** and **B**. However, in this experiment, you are allowed to choose only A. When everybody is finished choosing **A** in Stage 1, your screen will change to this.

The screenshot shows a window titled "確認" (Confirmation) with a progress indicator "1 / 1" and a timer "残り時間 [時] 102". The main text reads: "第1段階のルール" (Stage 1 Rules), "あなたは、あも人とペアになっています。実験の最後まで同じ人とペアになります。" (You are paired with Amoto. You will be paired with the same person until the end of the experiment.), "第1段階では、Aを選んでください。" (In Stage 1, please choose A.), and "分からないことがあれば、実験2の説明を参照してください。" (If you have any questions, please refer to the explanation for Experiment 2.). Below this is a table summarizing the user's choices:

あなたのID番号	1
第1段階のあなたの決定	A
第1段階の相手の決定	A

An "OK" button is located in the bottom right corner.

In this screen, you confirm what you and your partner did in Stage 1. Then, click the OK button in the lower right corner. When everybody has clicked buttons, you will see the following screen.

第2段階のルール

あなたのペアは第1段階のときと同じです。実験の最後まで同じ人とペアになります。

第2段階では、CあるいはDのどちらかの選択自由を選んでください。

分からないことがあれば、実験員の説明を参照してください。

あなたのID番号 1

第2段階のあなたの決定 C D

OK

The middle panel says,

The rule of Stage 2

Your partner is the same as in Stage 1. You will be matched with the same person till the end of the experiment. In Stage 2, please choose C or D. If there is anything you do not understand, please refer to the instructions.

In the bottom panel, “your ID number” appears first and you make your decision for Stage 2. There are two radio buttons, C and D. **You can choose one of them freely.** For example, assume that you and your partner choose C, and the screen changes to the following.



Please look at the Top-left panel. It says:

Your payoff

You chose C, your partner chose C

If your group did not draw a payoff reduction lottery, you both get 40 points each (the probability not to draw this lottery is 90%). If your group drew the lottery, you both get 0 points each (the probability to draw this lottery is 10%).

You chose C, your partner chose D

You get 0 points, your partner get 35 points.

You chose D, your partner chose C

You get 35 points, your partner get 0 points.

You chose D, your partner chose D

You and your partner both get 35 points each.

All the cases except for the case that both you and your partner choose C, **regardless of the result of the lottery**, a person who chose C gets 0, a person who chose D gets 35 points. That is, if either one of you chose **D**, the lottery does not affect your payoff.

Top-right panel says:

Your payoff from the next round

You and your partner chose C and your group did not draw a payoff reduction lottery, your group goes back to Stage 1 and choose A. Except for this case, you and your partner are forced to choose B in Stage 1 from the next round. Each of you gets automatically 20 points each.

The bottom panel describes:

Your ID number

Your payoff for this round

Your decision in Stage 1

Your partner's decision in Stage 1

Your decision in Stage 2

Your partner's decision in Stage 2

Whether your group drew a payoff reduction lottery or not

The example above is the case which your group did not draw a payoff reduction lottery and your payoff is 40 points. If your group had drawn a payoff reduction lottery, you get 0 points. Check the result in the following picture.



If you and your partner chose **C** and your group did not draw a payoff reduction lottery, your group goes back to Stage 1 to choose **A** and then can proceed Stage 2. However, in other cases as follows,

- (1) You and your partner chose **C** and draw a payoff reduction lottery
- (2) Either you or your partner chose **D**, or both chose **D** (Your choice, partner's choice) = (C, D), (D, C), (D, D)

you and your partner are forced to choose **B** in Stage 1 and you automatically get 20 points in every later round. In this case, you do not see a screen for decision making, but you see the following result screen.

2 / 2		残り時間 [秒] 100														
<p>得点の決まり方</p> <p>あなたがC、相手もCのとき あなたのグループが減額くじに当たらなかつたら、両方40点(当たらない確率は90%です。) あなたのグループが減額くじに当たったら、両方得点は0点(当たる確率は10%です。)</p> <p>あなたがC、相手がDのとき あなたは20点、相手は0点</p> <p>あなたがD、相手がCのとき あなたは0点、相手は20点</p> <p>あなたがD、相手もDのとき あなたも相手も0点</p>	<p>次回以降の得点の決まり方</p> <p>あなたと相手が両方Cを選んで、減額くじに当たらなければ、また第1段階へ戻ってAを選びます。 これ以外の場合は、次回以降は、第1段階で強制的に引き当り人、実験者が決まるまで、毎回自動的に20点もらいます。</p>															
<table border="0"> <tr> <td>あなたの印番号</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>今回のあなたの利得</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>第1段階のあなたの意思決定</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>第1段階のあなたのペアの意思決定</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>第2段階のあなたの意思決定</td> <td>選択なし</td> </tr> <tr> <td>第2段階のあなたのペアの意思決定</td> <td>選択なし</td> </tr> <tr> <td>あなたのグループが減額くじに当たったかどうか</td> <td>くじなし</td> </tr> </table>			あなたの印番号	1	今回のあなたの利得	20	第1段階のあなたの意思決定	B	第1段階のあなたのペアの意思決定	B	第2段階のあなたの意思決定	選択なし	第2段階のあなたのペアの意思決定	選択なし	あなたのグループが減額くじに当たったかどうか	くじなし
あなたの印番号	1															
今回のあなたの利得	20															
第1段階のあなたの意思決定	B															
第1段階のあなたのペアの意思決定	B															
第2段階のあなたの意思決定	選択なし															
第2段階のあなたのペアの意思決定	選択なし															
あなたのグループが減額くじに当たったかどうか	くじなし															
OK																

Please look at the bottom panel. Your payoff for this round is 20 points. The panel shows that your decision and your partner's decision for Stage 1 are **B**. It also shows that your decision and your partner's decision for Stage 2 are "no choice." Also it shows that your group did not draw a lottery.

Now we will practice following 5 examples to understand how your payoff is determined. We will also practice how to manipulate the computers. First please fill in the blanks below. We will repeat 5 rounds for each question.

- (1) Both chose **C** and your group did not draw a payoff reduction lottery

Your payoff points Your partner's payoff points

- (2) Both chose **C** and your group drew a payoff reduction lottery

Your payoff points Your partner's payoff points

Your payoff from the next round points

Your partner's payoff from the next round points

- (3) Both chose **D**.

Your payoff points Your partner's payoff points

Your payoff from the next round points

Your partner's payoff from the next round points

- (4) You chose **C** and your partner chose **D**

Your payoff points Your partner's payoff points

Your payoff from the next round points

Your partner's payoff from the next round points

- (5) You chose **D** and your partner chose **C**

Your payoff points Your partner's payoff points

Your payoff from the next round points

Your partner's payoff from the next round points

Next we will practice using the computers. Please raise your hand if you have a question, and the experimenter will come to your seat to explain.

References

- Ai, C.R., Norton, E.C., 2003. Interaction terms in logit and probit models. *Economics Letters* 80, 123–129.
- Aubert, C., Rey, P., Kovacic, W., 2006. The impact of leniency and whistleblowing programs on cartels. *International Journal of Industrial Organization* 24, 1241–1266.
- Apestequia, J., Dufwenberg, M., Selten, R., 2007. Blowing the whistle. *Economic Theory* 31, 143–166.
- Brisset, K., Thomas, L., 2004. Leniency program: a new tool in competition policy to deter cartel activity in procurement auctions. *European Journal of Law and Economics* 17, 5–19.
- Fischbacher, U., 1999. z-Tree: a toolbox for readymade economic experiments. Working Paper No. 21, University of Zurich.
- Hammond, S.D., 2003. Beating cartels at their own game – sharing information in the fight against cartels. Competition Policy Research Center of Japan Fair Trade Commission: Inaugural Symposium, Tokyo, November 20.
- Harrington, J., 2006. Corporate leniency programs and the role of the antitrust authority in detecting collusion. Competition Policy Research Center/COE Symposium: Towards an Effective Implementation of New Competition Policy, Tokyo, January 27.
- Hinloopen, J., 2002. The effectiveness of leniency programs under European style antitrust legislation. Unpublished manuscript.
- Hinloopen, J., Soetevent, A.R., 2008. Laboratory evidence on the effectiveness of corporate leniency programs. *RAND Journal of Economics* 39, 607–616.
- Huck, S., Normann, H., Oechssler, J., 2004. Two are few and four are many: number effects in experimental oligopolies. *Journal of Economic Behavior & Organization* 53 (4), 435–446.
- Lowe, P., 2003. What's the future for cartel enforcement. Presented at the Conference for Understanding Global Cartel Enforcement at Brussels, February 11.
- Monti, M., 2002. The fight against cartels. summary of the Talk by Mario Monti to EMAC, September 11.
- Motta, M., 2004. *Competition Policy: Theory and Practice*. Cambridge University Press.
- Motta, M., Polo, M., 2003. Leniency programs and cartel prosecution. *International Journal of Industrial Organization* 21 (3), 347–379.
- Nippon Keidanren, 2004. Public Comments on the Proposed Revision of the Antimonopoly Law. June 25. <http://www.keidanren.or.jp/japanese/policy/2004/056.html>.
- Spagnolo, G., 2000. Optimal leniency program. FEEM Working Paper 42.
- Takeshima, K., 2007. The 60th Anniversary of the Antimonopoly Act. July, <http://www.jftc.go.jp/kouenkai/60syunen.html>.

Construction of Reversible Lattice Molecular Automata

Takayuki Nozawa and Toshiyuki Kondo

tknozawa@cc.tuat.ac.jp

Abstract

Several cellular automata (CA) models have been developed to simulate self-organization of multiple levels of structures. However, they do not obey microscopic reversibility and conservation laws. In this paper, we describe the construction of a *reversible lattice molecular automata* (RLMA) model, which simulates molecular interaction and self-organization of higher-order structures. The model's strict reversibility entails physically relevant conservation laws, and thus opens a way to precise application and validation of the methods from statistical physics in studying the necessary conditions for such multiple levels of self-organization.

Keywords: Reversible Cellular Automata; Molecular Aggregation; Self-organization; Artificial Chemistry

1 Introduction

Possessing and utilizing multiple levels of self-organized structures—sometimes addressed as *dynamical hierarchies*[1, 2]—is a characteristic feature of biological systems. Cellular automata (CA) and similar discrete paradigms have been effective in modeling such dynamical self-organization hierarchies. In the context of molecular aggregation, *lattice molecular automata* (LMA) simulates self-organization of water (polar solvent), monomers, and polymers into clusters and higher-order structures such as micelles[3, 4, 5], and similar models have been developed to simulate organization of compartment structure and proto-cell-like self-reproduction[6, 7].

However, these models do not obey microscopic *reversibility* and conservation laws, and therefore, the possibility and stability of the self-organized structures in these models are, to some extent, implied in their irreversible time evolution rules. Under the laws of physics, stable persistence of an organized structure requires effective utilization of limited resources and smooth disposal of generated entropy. Therefore, the constraint of reversibility should not be omitted in studying the necessary conditions for stable structures, using, for example, the canonical methods of statistical physics.

In this paper, we describe the construction of *reversible lattice molecular automata* (RLMA), which simulates self-organization of water, monomers, and polymers with a strictly reversible dynamics and physically appropriate conservation laws. Although several reversible CA models have been proposed to simulate self-organization processes[8, 9], our model can simulate self-organization of structures with *mobility*, which will be essential for realizing higher-order structures and higher functionality such as autonomy.

The rest of the paper is organized as follows. A formal definition of CA is provided and useful techniques in constructing reversible CA are briefly reviewed in Section 2. Features of the original LMA model and its relation to other models are also briefly reviewed there. The construction of our RLMA model is described in Section 3, along with the conservation laws derived from the reversible dynamics. Some simulations of monomers and polymers in polar solvent are presented in Section 4. Finally, our conclusion is drawn in Section 5. Appendix A presents an alternative approach for implementing reversible molecular rotation.

2 Preliminaries

2.1 Formalization of CA

On a d -dimensional spatial lattice \mathbb{Z}^d , each site (cell) $\mathbf{i} \in \mathbb{Z}^d$ is assigned with its *local state* $\omega_{\mathbf{i}} \in A$. The finite set A of local states is called an *alphabet*. A specification of local states over the whole space $\omega \triangleq (\omega_{\mathbf{i}})_{\mathbf{i} \in \mathbb{Z}^d} \in \Omega = A^{\mathbb{Z}^d}$ is called a *global state* or *configuration*.

The dynamics of a CA is given by the *local transition map* φ as

$$\omega_{\mathbf{i}}^{t+1} = \varphi((\omega_{\mathbf{j}}^t)_{\mathbf{j} \in \mathcal{N}(\mathbf{i})}), \quad (1)$$

where the *neighbor function* $\mathcal{N} : \mathbf{i} \mapsto (\mathbf{j}_1, \dots, \mathbf{j}_N)$ defines interaction range for each site \mathbf{i} . By applying the local map φ over the lattice, the *global transition map*

$$\omega^{t+1} = \Phi(\omega^t) \quad (2)$$

from a configuration at t to the one at $t + 1$ is derived. Although the application of φ over the space is synchronous in simple CA, making it asynchronous can be effective in satisfying reversibility and other constraints, as shown later. Furthermore, in more complicated CA, the local map φ consists not of a single map but of several maps (sub-steps), and the local states $\omega_{\mathbf{i}} \in A$ also have inner structures such as “partitions” or “layers.”

When the global transition map Φ is bijective, that is, when for any configuration ω^{t+1} its pre-image ω^t is unique, the CA is *reversible* (or *invertible*).

2.2 Construction of reversible CA

Reversibility entails *conservation of information*—differences in states cannot just appear from or vanish into nowhere. Hence the manner in which to prevent

information loss is crucial in constructing reversible CA.

Since the many-to-one local transition map φ in Eq. (1) obviously loses information by itself (Fig. 1(a)), the loss should be prevented by well-counterbalanced distribution among the interacting cells. However, designing such maps is far from trivial. Indeed, judging the reversibility of a global transition map Φ , given its corresponding local map φ , is a difficult task in itself.

An easier method to construct reversible CA is by adopting a *permutation* (reversible transformation on a finite set) ψ ,

$$\psi : A^B \rightarrow A^B, \quad (3)$$

instead of a many-to-one mapping φ , as a constituent of the transition rule (Fig. 1(b)). Here, B denotes a “block” of cells under the permutation. In *Partitioning CA* (or *block CA*)[10], for example, both the reversibility and global transmission of information are satisfied by combining the permutation and alternation of different partitioning schemes of a given space into cell-blocks.

The permutation (3) can be generalized into a *conditional permutation* as

$$\psi_c : A^S \rightarrow A^S, \quad c \in A^C. \quad (4)$$

Out of the set $C + S$ of cells that are subject to the mapping, the states of cells in C work as “control signals,” which determine a permutation for the states of S , and reappear unchanged as outputs (Fig. 1(c)). The Fredkin gate and the Toffoli gate are well-known examples of conditional permutations.

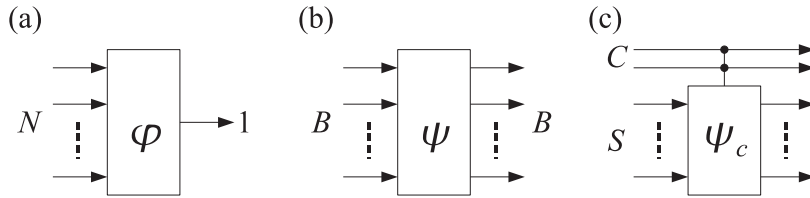


Figure 1: Mappings to constitute transition: (a) many-to-one mapping, (b) permutation, and (c) conditional permutation.

To prevent information loss, the outputs of the (conditional) permutations should be reused as inputs or conditional signals, and to achieve this, one needs to implement certain techniques such as dividing a time step into several *sub-steps*, and arranging the permutations *sparingly and asynchronously in space-time*[11].

For synchronous information transmission, one can also use global *shifts*, which uniformly displace some partitions or layers of local states. The translational movement of free particles can be effectively modeled by the shifts. In *lattice gas automata* (LGA)[12, 13], for example, shifts are utilized to express the translation of gas particles, in combination with permutations that represent the collisions of the particles. *Partitioned CA*[14] is virtually equivalent to the LGA.

2.3 LMA model and other models

Various models have been proposed and used to simulate molecular self-organization processes. On the one hand, the molecular dynamics (MD) method models molecules as particles with appropriate interaction potentials, and solves their equations of motion in continuous space[15]. While the MD enables microscopically detailed description of the dynamics, size of the simulated system is restricted by the available computer resources. On the other hand, lattice-type models have been successful on simulating macroscopic behavior of phase separation and aggregation processes. Especially the Larson model[16, 17, 18] and its variants[19, 20, 21, 22] are widely used and many results are reported. In the traditional Larson model simulating ternary mixture of water, oil (hydrophobic monomers), and surfactant (amphiphilic polymers), water and hydrophobic monomers are represented by a set of up and down (+1, -1) spins, respectively, and polymers are represented by strings of spins. Monte Carlo method is used for update and the ferromagnetic interaction between the spins induces phase separation, micelle formation, etc.

The original LMA model bridges the gap between the MD method and the Larson-type models[5]: While realized in a discrete manner and thus keeping the efficiency of the lattice setting, it includes some microscopic molecular details, such as hydrodynamics conserving momenta in the molecular collision, directions of polar molecules and accompanied anisotropy of molecular potential energy. A distinguishing feature of the LMA model is the equienergetic interaction for the pairs water-hydrophobic monomer and hydrophobic monomer-hydrophobic monomer, following experimental data on enthalpy exchanges in mixtures[23]. This setting is in contrast to the Larson models, which define positive enthalpic gains for oil-oil interaction but not for water-oil interaction. Consequently, in the LMA model phase separation is realized via *entropy-driven* hydrophobic effect, and not enthalpy-driven as in the Larson-type models.

Although update rule of the LMA model partially keeps the conservation laws, its dynamics is not microscopically reversible (refer to section IV.B and V of Ref. [3] for example to see the total energy is conserved in the mean but not strictly and explicitly). Therefore, utilizing the techniques introduced in section 2.2, we construct our RLMA model in the next section.

3 RLMA Model

3.1 Space

We formalize the RLMA model on the two-dimensional triangular lattice (Fig. 2(a), (b)) as in the literature[3, 4], although generalization to other lattice structures and to higher dimensions will be straightforward. We use the variable $l \in \{+1, +2, +3, -1, -2, -3\} \equiv L$ to denote the principal directions, and $l(i)$ to denote cell i 's nearest neighbor in direction l , as shown in Fig. 2(c). L corresponds to $\{0, \pi/6, \dots, 5\pi/6\}$ in the equilateral triangular lattice with a proper coordinate system (Fig. 2(c)), and on L , we define a cyclic permutation Δ of

length 6,

$$\Delta = \begin{pmatrix} +1 & +2 & +3 & -1 & -2 & -3 \\ +2 & +3 & -1 & -2 & -3 & +1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

which corresponds to $+\pi/6$ rotation operator for the principal directions.

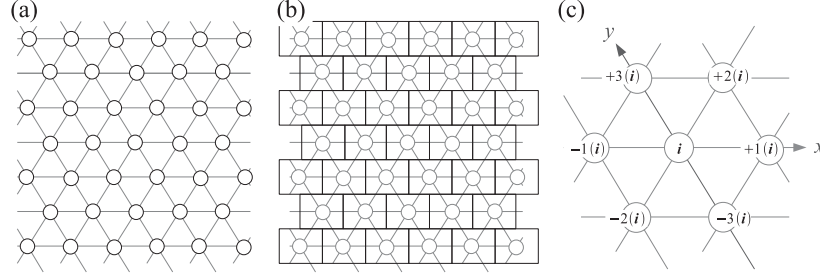


Figure 2: Two-dimensional triangular lattice: (a) structure, (b) corresponding cells, and (c) principal directions and nearest neighbors.

3.2 Local states

Each local state has the *layers* (internal data structure) shown in Table 1.

Table 1: Structure of local states.

Layer name and variable	Values
Molecular type $mt_{\mathbf{i}}$	Water (W), hydrophilic monomer (I), hydrophobic monomer (O), or vacuum (V)
Molecular orientation $mo_{\mathbf{i}}$	$mo_{\mathbf{i}} \in L$ for polar molecules, $mo_{\mathbf{i}} = \mathbf{null}$ otherwise
Translational kinetic energy $(tke_{\mathbf{i},l})_{l \in L}$	$tke_{\mathbf{i},l} \in \{0, 1\}$ for molecules, while non-zero values in the opposing directions are forbidden
Rotational kinetic energy $rke_{\mathbf{i}}$	$\{-1, 0, +1\}$ (polar: $\{\pm 1\}$, non-polar: 0)
Molecular bonds $(mb_{\mathbf{i},l})_{l \in L}$	Up to two bonds for hydrophilic or hydrophobic monomers
Heat particles $(h_{\mathbf{i},l})_{l \in L}$	$h_{\mathbf{i},l} \in \{0, \dots, H_{\max}\}$ for each $l \in L$
Preferential direction $pd_{\mathbf{i}}$	$pd_{\mathbf{i}} \in L$

For each cell $\mathbf{i} \in \mathbb{Z}^2$, *molecular type* $mt_{\mathbf{i}}$ takes one of three types of molecules—*water* (W), *hydrophilic monomer* (I), *hydrophobic monomer* (O), or *vacuum* (empty; V). For example, one can consider the hydrophilic monomer to be acetic acid and the hydrophobic monomer to be methane. A site can contain at most one molecule; this constraint corresponds to *excluded volume*.

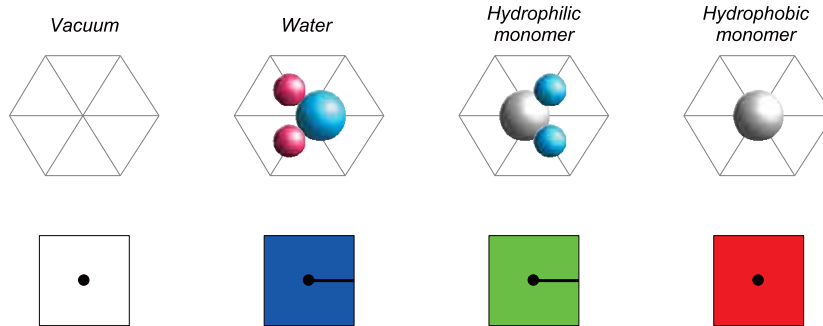


Figure 3: Molecular types. Upper row: schematic illustrations. Lower row: representations in visualization of the simulation results; bars indicate the orientations of polar molecules.

Water and hydrophilic monomers are polar molecules; therefore, they have *molecule orientation* $mo_i \in L$. (For hydrophobic monomers and vacuum, $mo_i = \text{null}$.) We define that, for water in orientation mo , the same direction represents negative polarization (corresponding to one oxygen) and $\Delta^{\pm 2}(mo)$ represents positive polarization (corresponding to two hydrogens), and for a hydrophilic monomer in orientation mo , $\Delta^{\pm 1}(mo)$ represents negative polarization (corresponding to O or OH) (See Fig. 3). Molecular orientation affects the strength of *potential energy* induced by several kinds of molecular interaction (see section 3.3).

The sites occupied by molecules have *translational kinetic energy* (TKE) $tke_{i,l} \in \{0, 1\}$ in every principal direction $l \in L$, although non-zero energy values in opposite directions on the same line are forbidden ($tke_{i,l} + tke_{i,-l} \leq 1$). Hence, there are 27 possible TKE states for a molecule (Fig. 4).

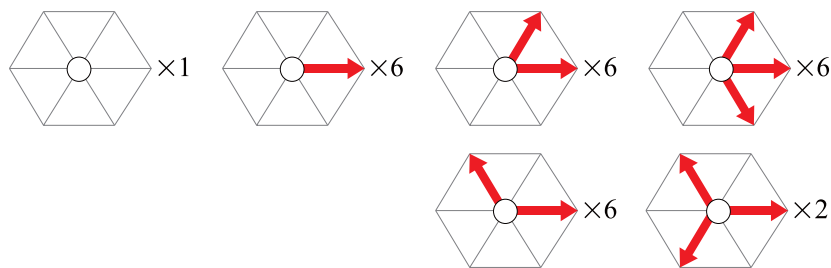


Figure 4: Possible states of translational kinetic energy for a molecule.

Molecules can have *rotational kinetic energy* (RKE) rke_i , which allows the rotation of the polar molecules to be reversible (see section 3.4.4). For proper

update by the rotation rule given here, we confine the value of rke_i to $\{+1, -1\}$ for polar molecules, and to zero for non-polar molecules or vacuum. (For an alternative setting, see Appendix A.)

Hydrophilic and Hydrophobic monomers can have *molecular bonds* with neighboring monomers. We define that

$$mb_{i,l} = \begin{cases} 1 & \text{if two monomers at } i \text{ and } l(i) \text{ are bonded,} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

(Thus, $mb_{i,l} = mb_{l(i),-l}$.) *Polymers* can be composed as a group of monomers linked by the bonds, as shown in Fig. 5. In the current study, we suppose that for each monomer to have the bonds in at most two directions, $\sum_{l \in L} mb_{i,l} \leq 2$; thus, the polymers are one-dimensional. One can consider the polymers to be fatty acids.

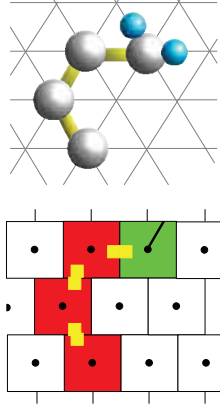


Figure 5: Schematic representation of a polymer.

For the above layers, which are related to molecules, we also overlay the *heat particles* layer on each cell. The heat particle variable $h_{i,l}$ can take values of $\{0, \dots, H_{\max}\}$ independently for every direction $l \in L$.

Finally, we append the *preferential direction* $pd_i \in L$ for each cell i . In the transition rule given below, the preferential direction works as a “fluctuation” to break irreversibility-inducing symmetry. The *parity* of the preferential direction, defined by

$$\text{parity}(pd_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } pd_i \in \{+1, +3, -2\}, \\ -1 & \text{if } pd_i \in \{+2, -1, -3\}, \end{cases} \quad (7)$$

is also utilized in the transition rule.

Molecular type, orientation, TKE and, molecular bonds (or variables equivalent to them) are included in the original LMA[4, 5]. On the other hand, RKE, heat particles, and preferential direction are introduced in this model to implement reversibility in a physically appropriate manner.

3.3 Potential energy

Every molecule interacts with its nearest neighboring molecules;¹ therefore, it has *potential energies* for each of the six principal directions. In calculating potential energy, we consider only pairwise interactions, and let $V^{i,l(\hat{i})}$ denote potential energy arising from the interaction between molecules at \mathbf{i} and $l(\hat{i})$. The molecular interaction is divided into three classes:²

- Electrostatic interactions between permanent multipoles, which take place when the polarized directions of the two polar molecules face each other. Let $V_{\text{perm-perm}}$ represent the potential energy contribution from this class of interactions.
- Induction-based interactions between a permanent multipole and an induced multipole, which take place when a polarized direction of one molecule faces an originally non-polarized direction of another. Let $V_{\text{perm-ind}}$ represent the potential energy contribution from this class of interactions.
- London dispersion interactions between induced multipoles, which take place when the surfaces of two non-polar molecules face each other. Let $V_{\text{ind-ind}}$ represent the potential energy contribution from this class of interactions.

Then, the total potential energy in the system is calculated as

$$V_{\text{total}} = \frac{1}{2} \sum_{\mathbf{i}} \sum_{l \in L} V^{i,l(\hat{i})} = \frac{1}{2} \sum_{\mathbf{i}} \sum_{l \in L} \left(V_{\text{perm-perm}}^{i,l(\hat{i})} + V_{\text{perm-ind}}^{i,l(\hat{i})} + V_{\text{ind-ind}}^{i,l(\hat{i})} \right). \quad (8)$$

For the full specification of the potential terms in our model, the integer parameters listed in Table 2 must be given.

3.4 Transition rule

In the original LMA model, each unit-time update consists of the following sub-steps[4]:

1. propagation of the molecular type and redistribution of kinetic energies,
2. construction of type-specific force fields,
3. calculation of potential energies,
4. calculation of the most proper move direction,
5. readjustment of bonds in polymers according to the move direction, and
6. movement of the molecule and clearing of the old lattice position.

¹Although wider range of interaction can also be modeled, it requires larger number of *site groups* and more complicated update schemes (see section 3.4).

²We omit cooperativity effects because of their minor influence on the simulation results.

Table 2: Parameters of potential energy. Potentials of other neighboring directions of molecular pairs are set to 0.

Class	Potential	Applied cases
$V_{\text{perm-perm}}$	$V_{\text{WH-WH}}$	Where positively polarized directions (Hs) of two water molecules (Ws) face each other
	$V_{\text{WO-WO}}$	Where negatively polarized directions (Os) of two Ws face each other
	$V_{\text{WH-WO}}$	Where an H and an O of two Ws face each other
	$V_{\text{WH-IP}}$	Where an H of a W faces a negatively polarized direction (O or OH) of a hydrophilic monomer (I)
	$V_{\text{WO-IP}}$	Where an O of a W faces a negatively polarized direction of an I
	$V_{\text{IP-IP}}$	Where two negatively polarized directions of two Is face each other
$V_{\text{perm-ind}}$	$V_{\text{WH-WN}}$	Where an H and a non-polarized direction of two Ws face each other
	$V_{\text{WH-IN}}$	Where an H of a W faces a non-polarized direction of an I
	$V_{\text{WH-O}}$	Where an H of a W faces any one of directions of a hydrophobic monomer (O)
	$V_{\text{WO-WN}}$	Where an O and a non-polarized direction of two Ws face each other
	$V_{\text{WO-IN}}$	Where an O of a W faces a non-polarized direction of an I
	$V_{\text{WO-O}}$	Where an O of a W faces any one of directions of an O
	$V_{\text{IP-WN}}$	Where a negatively polarized direction of an I faces a non-polarized direction of a W
	$V_{\text{IP-IN}}$	Where a negatively polarized direction and a non-polarized direction of two Is face each other
	$V_{\text{IP-O}}$	Where a negatively polarized direction of an I faces any one of directions of O
$V_{\text{ind-ind}}$	$V_{\text{O-O}}$	Where any directions of two Os face each other

Although stated otherwise in Ref. [5], many of these sub-steps are irreversible in actuality, involving erasure and duplication of information. To realize reversibility, therefore, we reconstruct the sub-steps and create new ones, utilizing the techniques introduced in section 2.2.

3.4.1 Molecular translation, collision, and excluded volume

In the LMA, for each molecule, the most proper move direction is calculated based on its TKEs and potentials, and the molecule moves to the direction if the movement satisfies the constraints of excluded volume and molecular bond maintenance. This rule causes situations whose pre-images are not unique (*e.g.*, a molecule at a site might have come from one of the neighboring sites according to the most proper move direction, or might have been at the same site a unit time ago because of the constraints), and thus it is irreversible.

To satisfy the constraints of excluded volume and molecular bond maintenance, and to realize reversibility at the same time, we introduce *site groups*. Sites in each group should be scattered uniformly and sparsely enough (to prevent interference of the pairwise interactions defined below, the sites in each group should be separated by at least four times the unit distance). We determine the group to which site \mathbf{i} belongs at time t by the following map

$$g(\mathbf{i}, t) = \{4(i_x \bmod 4) + (i_y \bmod 4) + t\} \bmod 16, \quad (9)$$

and let $G = \{0, 1, \dots, 15\}$ denote the range of g . Here (i_x, i_y) are the coordinates of site \mathbf{i} given by the axis in Fig. 2(c), and each site is assigned to a group, as shown in Fig. 6.

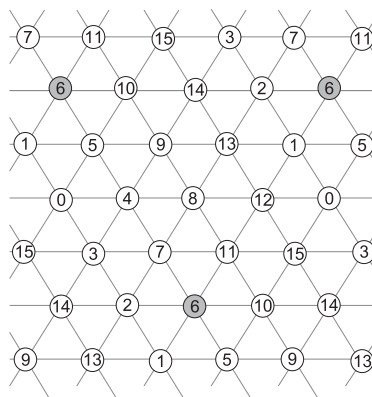


Figure 6: Site groups for interleaved interaction. Sites in the group indexed “6” are shaded.

Using the site groups and the preferential directions, molecular translation and collision are performed in an interleaved manner using the scheme shown in Fig.7.

```

begin
for  $g$  in site groups  $G$  do
  for  $k$  in  $(0, 1, \dots, 5)$  do
    for every  $i$  in a group  $g$  do
       $j := pd_i(i)$ ;
      if  $\Delta^k(pd_j) = pd_i$  then
         $\psi_{\text{mtc}}(\omega_i, \omega_j)$ ; //pairwise interaction between  $i$  and  $j$ .
      end
    end
  end
end

```

Figure 7: Interleaved paired site interaction scheme. Note Eq. (5) for the definition of Δ .

For the interaction between paired neighboring sites i and $j = pd_i(i)$ in Fig. 7, we define a composite conditional permutation ψ_{mtc} , which represents molecular translation and collision.

When both sites are vacuum, no interaction takes place:

$$mt_i = mt_j = V \Rightarrow \psi_{\text{mtc}}(\omega_i, \omega_j) = (\omega_i, \omega_j) \text{ (identity)}. \quad (10)$$

When i is occupied by a molecule and j is vacuum, the molecule at i moves to j if the TKE in this direction pd_i is positive, or the molecule's TKE in this direction is inverted if the TKE in the opposite direction is positive, or no change takes place if the molecule's TKEs are zero in both directions:

$$\left. \begin{array}{l}
 mt_i \neq V, mt_j = V \Rightarrow \\
 \psi_{\text{mtc}} \left(\left(\begin{array}{c} mt_i \\ mo_i \\ (tke_{i,l})_l \\ rke_i \\ (mb_{i,l})_l \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} mt_j \\ mo_j \\ (tke_{j,l})_l \\ rke_j \\ (mb_{j,l})_l \end{array} \right) \right) = \left(\left(\begin{array}{c} mt_j \\ mo_j \\ (tke_{j,l})_l \\ rke_j \\ (mb_{j,l})_l \end{array} \right), \left(\begin{array}{c} mt_i \\ mo_i \\ (tke_{i,l})_l \\ rke_i \\ (mb_{i,l})_l \end{array} \right) \right) \\
 \psi_{\text{mtc}}(tke_{i,pd_i}, tke_{i,-pd_i}) = \begin{array}{l}
 (tke_{i,-pd_i}, tke_{i,pd_i}) \\
 \text{if } (tke_{i,pd_i}, tke_{i,-pd_i}) = (1, 0), \\
 (tke_{i,pd_i}, tke_{i,-pd_i}) = (0, 1), \\
 \psi_{\text{mtc}}(\omega_i, \omega_j) = (\omega_i, \omega_j) \\
 \text{if } (tke_{i,pd_i}, tke_{i,-pd_i}) = (0, 0).
 \end{array}
 \end{array} \right\} \quad (11)$$

(Here, internal layers that are unaffected by ψ_{mtc} are omitted.) Conversely, when i is vacuum and j is occupied by a molecule, the molecule's move direction pd_i is replaced by $-pd_i$ in the above equation. Note that if the preferential directions are uniform over all of the sites, a free molecule without molecular interaction always maintains the directions of its TKEs after one full unit-time update, because whenever an inversion of TKE takes place, it is canceled by another inversion in the update scheme of Fig. 7. This does not hold, however, if the preferential directions are not uniform. This issue will be addressed again in section 3.6.

When both \mathbf{i} and \mathbf{j} are occupied by molecules, the two molecules exchange TKEs as in an elastic collision

$$\begin{aligned} mt_{\mathbf{i}} \neq V \wedge mt_{\mathbf{j}} \neq V \\ \Rightarrow \psi_{\text{mtc}}(tke_{\mathbf{i}, \pm pd_{\mathbf{i}}}, tke_{\mathbf{j}, \pm pd_{\mathbf{i}}}) = (tke_{\mathbf{j}, \pm pd_{\mathbf{i}}}, tke_{\mathbf{i}, \pm pd_{\mathbf{i}}}). \end{aligned} \quad (12)$$

3.4.2 Maintenance of molecular bonds

As mentioned earlier, polymers are composed as chains of monomers linked by molecular bonds (Fig. 5). Integrated and coherent motion of such a multi-site structure (“solid body”) is difficult to model using CA. A possible approach is to express the structure’s motion states by its deforming shape[24, 25]. Although this method can replicate many aspects of Hamiltonian mechanics as well as the structure’s integrity, it makes it difficult to formalize proper interaction between such a structure and the single-site particles (molecules) whose motion states are expressed as their internal states. In the RLMA, the maintenance of bonds is ensured by using the bond information as another conditional signal for the molecular translational permutation (11).

First, it is checked if the molecular bonds (provided they exist) are maintained when the molecule at \mathbf{i} moves to the vacuum site $\mathbf{j} = pd_{\mathbf{i}}(\mathbf{i})$. Bonds with molecules at $\Delta^{\pm 1}(pd_{\mathbf{i}})(\mathbf{i})$ are not destroyed by the movement because the bonded molecules remain neighbors (the bond directions after movement become $\Delta^{\pm 2}(pd_{\mathbf{i}})$; Fig. 8(a)). If the molecule has bonds in other directions, these bonds are destroyed by the movement (Fig. 8(b)). Therefore, we append another condition to the permutation (11):

$$\begin{cases} mt_{\mathbf{i}} \neq V, mt_{\mathbf{j}} = V \Rightarrow \\ \text{Apply (11) followed by bond readjustment } \psi_{\text{br}} & \text{if } mb_{\mathbf{i}, \Delta^{\pm 2}(pd_{\mathbf{i}})} = mb_{\mathbf{i}, -pd_{\mathbf{i}}} = 0, \\ \psi_{\text{mtc}}(\omega_{\mathbf{i}}, \omega_{\mathbf{j}}) = (\omega_{\mathbf{i}}, \omega_{\mathbf{j}}) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

The readjustment of bonds ψ_{br} takes place not only at the moved molecule’s new position \mathbf{j} but also at $\Delta^{\pm 1}(pd_{\mathbf{i}})(\mathbf{i})$ if the bonds exist:

$$\psi_{\text{br}} \left(\begin{array}{c} mb_{\mathbf{j}, \Delta^{+1}(pd_{\mathbf{i}})}, mb_{\mathbf{j}, \Delta^{+2}(pd_{\mathbf{i}})} \\ mb_{\Delta^{+1}(pd_{\mathbf{i}})(\mathbf{i}), \Delta^{-2}(pd_{\mathbf{i}})}, mb_{\Delta^{+1}(pd_{\mathbf{i}})(\mathbf{i}), \Delta^{-1}(pd_{\mathbf{i}})} \\ mb_{\mathbf{j}, \Delta^{-1}(pd_{\mathbf{i}})}, mb_{\mathbf{j}, \Delta^{-2}(pd_{\mathbf{i}})} \\ mb_{\Delta^{-1}(pd_{\mathbf{i}})(\mathbf{i}), \Delta^{+2}(pd_{\mathbf{i}})}, mb_{\Delta^{-1}(pd_{\mathbf{i}})(\mathbf{i}), \Delta^{+1}(pd_{\mathbf{i}})} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} 0, mb_{\mathbf{j}, \Delta^{+1}(pd_{\mathbf{i}})} \\ 0, mb_{\Delta^{+1}(pd_{\mathbf{i}})(\mathbf{i}), \Delta^{-2}(pd_{\mathbf{i}})} \\ 0, mb_{\mathbf{j}, \Delta^{-1}(pd_{\mathbf{i}})} \\ 0, mb_{\Delta^{-1}(pd_{\mathbf{i}})(\mathbf{i}), \Delta^{+2}(pd_{\mathbf{i}})} \end{array} \right), \quad (14)$$

A drawback of this rule is that it occasionally causes motion of polymers that has less physical relevance. For example, when a polymer’s constituent monomers are arranged on a straight line and all of the monomers have positive TKE only on the line, the polymer cannot move even if all of the monomers’ TKE directions are identical. However, if some of the monomers have positive TKEs in other directions, this polymer can move on average to its most proper direction with respect to TKE, while becoming deformed and keeping its integrity.

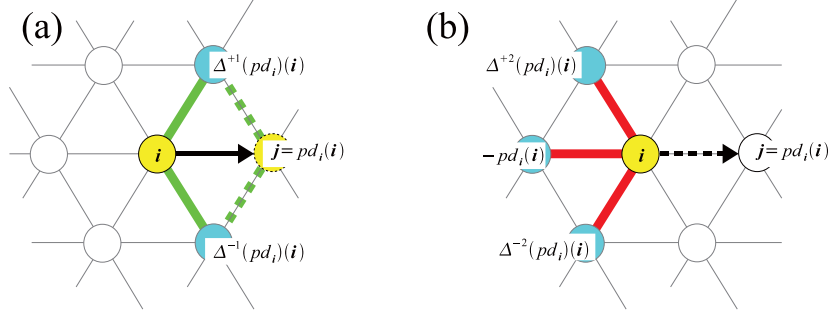


Figure 8: Translational movement and molecular bonds. If a molecule at i is moving to $j = pd_i(i)$, (a) its bonds in directions $\Delta^{\pm 1}(pd_i)$ are maintained with their directions readjusted to $\Delta^{\pm 2}(pd_i)$, but (b) bonds in directions $\Delta^{\pm 2}(pd_i)$ and $-pd_i$ would not be maintained.

3.4.3 Self-organization and reversibility

In irreversible models such as the LMA, the tendency of self-organization from disordered high-entropy states to ordered low-entropy structures is embedded in their information-losing transition rules themselves. To realize “apparent” self-organization of ordered structures by a reversible rule without information loss, the rule needs additional degrees of freedom that work as a *heat bath* into which the entropy generated in the organization process should be disposed of. The deterministic Ising model[8] and the reversible generalization[9] of the diffusion limited aggregation (DLA) model[26] are examples of this approach. We also adopt this approach, using the *heat particle layer* as the heat bath.

When both of the neighboring sites i and j have molecules, in advance of the collision (12) by ψ_{mtc} , we apply site-respective TKE–heat interaction ψ_{th} defined as follows. For the molecule at site \mathbf{x} (i.e., either i or j), when it has positive TKE in one direction l out of $\{\pm pd_i\}$ (i.e., along the line connecting the two molecules), and when the heat particles satisfy $h_{\mathbf{x},l} < H_{\text{max}}$ and $h_{\mathbf{x},-l} = 0$ at site \mathbf{x} , then the positive TKE is transformed into a heat particle in the same direction l (heat release):

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{\text{th}} \left(\begin{array}{l} tke_{\mathbf{x},\pm pd_i} \\ h_{\mathbf{x},\pm pd_i} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} tke_{\mathbf{x},\pm pd_i} - 1 \\ h_{\mathbf{x},\pm pd_i} + 1 \end{array} \right) \\ \psi_{\text{th}}(\omega_{\mathbf{x}}) = \omega_{\mathbf{x}} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{if } (tke_{\mathbf{x},\pm pd_i}, tke_{\mathbf{x},\mp pd_i}) = (1, 0) \\ \text{and } h_{\mathbf{x},\pm pd_i} < H_{\text{max}}, h_{\mathbf{x},\mp pd_i} = 0, \\ \text{otherwise.} \end{array} \quad (15)$$

On the other hand, when the molecule at \mathbf{x} does not have a TKE in either of $\{\pm pd_i\}$ and heat particles exist in only one of the two directions, one heat

particle is transformed into the TKE in the same direction (heat absorption):

$$\begin{cases}
mt_i \neq V, mt_j \neq V \text{ then for } \mathbf{x} \in \{\mathbf{i}, \mathbf{j}\} \\
\psi_{\text{th}} \begin{pmatrix} tke_{\mathbf{x}, \pm pd_i} \\ h_{\mathbf{x}, \pm pd_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} tke_{\mathbf{x}, \pm pd_i} + 1 \\ h_{\mathbf{x}, \pm pd_i} - 1 \end{pmatrix} & \text{if } (tke_{\mathbf{x}, pd_i}, tke_{\mathbf{x}, -pd_i}) = (0, 0) \\
& \text{and } h_{\mathbf{x}, \pm pd_i} > 0, h_{\mathbf{x}, \mp pd_i} = 0, \\
\psi_{\text{th}}(\omega_{\mathbf{x}}) = \omega_{\mathbf{x}} & \text{otherwise.}
\end{cases} \quad (16)$$

Introduction of this TKE–heat interaction makes the interaction between neighboring molecules non-elastic.

For molecular translation, potentials work as yet another control signal for the permutation in ψ_{mtc} of Eq. (11), and the translation is executed only if the changes in potentials entailed by the movement of molecule from \mathbf{i} to \mathbf{j} , given that their neighbors are fixed, can be compensated for by emission/absorption of heat particles at \mathbf{i} and \mathbf{j} :

$$\begin{cases}
mt_i \neq V, mt_j = V \Rightarrow \\
\begin{cases}
\text{Proceed to (13)} & \text{if } 0 \leq h_{i,l} - \delta^{(-)}V^{i,l(i)} \leq H_{\text{max}} \text{ and} \\
& 0 \leq h_{j,l} - \delta^{(+)}V^{j,l(j)} \leq H_{\text{max}} \text{ for } l \in L, \\
\psi_{\text{mtc}}(\omega_i, \omega_j) = (\omega_i, \omega_j) & \text{otherwise.}
\end{cases}
\end{cases} \quad (17)$$

Here, $\delta^{(-)}V^{i,l(i)}$ represents the potential change in direction l caused by removing the molecule from its current site \mathbf{i} , and $\delta^{(+)}V^{j,l(j)}$ represents a potential change in direction l caused by placing the molecule (while maintaining its orientation) at vacuum site \mathbf{j} . Further, when the translation is actually induced by the permutation (11), it is followed by the potential change compensation ψ_{pcc} :

$$\psi_{\text{pcc}}((h_{i,l})_l, (h_{j,l})_l) = ((h_{i,l} - \delta^{(-)}V^{i,l(i)})_l, (h_{j,l} - \delta^{(+)}V^{j,l(j)})_l). \quad (18)$$

Thus, a molecule moving to a more stable site ($\sum_l \delta^{(+)}V^{j,l(j)} < 0$) releases heat particles in total, and it can be dissociated again from its neighbors only when enough energy is supplied by the heat particle layer.

3.4.4 Rotation of polar molecules

Polar molecules such as water and hydrophilic monomers can take different potential values depending on their orientations. According to the LMA rule, the polar molecules are rotated irreversibly into their more stable (lower-potential) orientations. To maintain reversibility and at the same time to enable relaxation into a more stable direction configuration, we utilize RKE and also the heat particle layer. Similar to the paired site interaction in Fig. 7, rotational update is also performed in the interleaved scheme shown in Fig. 9. Here, we again use the site groups of Eq. (9) (although for the rotational permutation given below, interference can be prevented if the sites in each group are separated by more than a unit distance).

```

start
for  $g$  in site groups  $G$  do
  for every  $i$  in a group  $g$  do
    if  $mt_i \in \{W, I\}$  then //polar molecule
       $\rho(mo_i, rke_i, (h_{i,l})_{l \in L})$ ; //rotational update
    end
  end

```

Figure 9: Interleaved update scheme for molecular orientation and RKE with heat interaction.

The rotational update ρ is defined as follows: the polar molecule at i rotates according to the sign of RKE and the orientation becomes $\Delta^{rke_i}(mo_i)$ if the change in potentials caused by the rotation can be compensated for by emission/absorption of heat particles at the site. Otherwise, the molecule does not rotate and RKE is inverted:

$$\rho \begin{pmatrix} mo_i \\ rke_i \\ (h_{i,l})_l \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \Delta^{rke_i}(mo_i) \\ rke_i \\ (h_{i,l} - \delta(mo_i, \Delta^{rke_i})V^{i,l(i)})_l \end{pmatrix} \\ \quad \text{if } 0 \leq h_{i,l} - \delta(mo_i, \Delta^{rke_i})V^{i,l(i)} \leq H_{\max} \text{ for } \forall l \in L, \\ \begin{pmatrix} mo_i \\ -rke_i \\ (h_{i,l})_l \end{pmatrix} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (19)$$

Here

$$\delta(k, \Delta^n)V^{i,l(i)} \quad (20)$$

represents the potential change in direction l that occurs when the orientation of the molecule at i is changed from k to $\Delta^n(k)$, with the neighboring molecules fixed.

In this rule, the RKEs work as a kind of “second-order” signal[10], which preserves the history of the molecules’ rotational states. Therefore, the polar molecules cannot stop rotating i.e., $rke \neq 0$ (or given $rke \neq 0$ as the initial condition, they cannot change their orientations forever). For an alternative rotation rule that allows RKEs to take values on \mathbb{Z} , including the stationary state $rke = 0$, see Appendix A.

3.4.5 Transportation of heat particles

For the heat particle layer to function as a heat bath, the released heat particles should be effectively diffused into open areas. In our RLMA model, the diffusion of heat particles is conducted by a rule similar to that for the Frisch–Hasslacher–Pomeau lattice gas automata (FHP-LGA)[13], that is, for every unit-time update, a synchronous shift (translation) σ_h is performed in each direction

$$\sigma_h : h_{i,l} \mapsto h_{-l(i),l} \quad \text{for } l \in L \quad (21)$$

followed by a local collision ϕ_h at each site:

$$\phi_h : \begin{cases} ((h_{i,\Delta^l(k)})) = (m, 0, 0, m, 0, 0) & \mapsto \begin{cases} (0, m, 0, 0, m, 0) & \text{if parity}(pd_i) = +1, \\ (0, 0, m, 0, 0, m) & \text{if parity}(pd_i) = -1, \end{cases} \\ ((h_{i,\Delta^l(k)})) = (m, 0, m, 0, m, 0) & \mapsto (0, m, 0, m, 0, m) \\ ((h_{i,\Delta^l(k)})) & \mapsto ((h_{i,\Delta^l(k)})) \quad \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

with $0 < m \leq H_{\max}$ and $k \in \{1, 2, 3\}$. Note that the collision ϕ_h is deterministic and utilizes the parity of preferential direction at each site.

3.5 Composition of unit-time update

After integrating the sub-steps defined above, a unit-time update of the RLMA can be performed through the following time sub-steps (variables in parentheses are those affected by the particular sub-step):

1. Transportation of heat particles $((h_{i,l}), pd_i)$
Heat particles are diffused by the FHP-LGA-like combination of the shift (21) and collision (22).
2. Rotation of polar molecules $(mt_i, mo_i, rke_i, (h_{i,l}))$
Using the interleaved scheme of Fig. 9, molecular rotation is performed by the conditional permutation (19).
3. Molecular translation and interaction $(mt_i, mo_i, (tke_{i,l}), (mb_{i,l}), (h_{i,l}), pd_i)$
Using the interleaved scheme of Fig. 7,
 - molecular translation is performed by the paired site conditional permutation (11) with the conditions (13) and (17), while
 - molecular interaction is performed by the conditional permutation (12) with the heat release (15) and absorption (16).
4. Update of preferential direction (pd_i)
To ensure unbiasedness for the principal directions, the preferential direction should be updated according to time. We use the simple uniform rotation $pd_i \mapsto \Delta^{+1}(pd_i)$, although synchronous shifts and deterministic, invertible pseudorandom number generators can also be combined.

These sub-steps are independent; therefore, the order can be changed. Each sub-time step is reversible; therefore, the inverse update is achieved by performing this construction in reverse.

3.6 Conservation laws

From the above definitions, the transition rule of RLMA conserves *mass* (number of molecules) and the *total energy* that is given as a sum of TKEs, RKEs,

potential energies, and heat particles over the sites:

$$E_{\text{total}} = \sum_i \sum_{l \in L} tke_{i,l} + \sum_i |rke_i| + V_{\text{total}} + \sum_i \sum_{l \in L} h_{i,l}. \quad (23)$$

These conservation laws enable precise application and validation of methods and theorems in statistical mechanics, both equilibrium (microcanonical, canonical, and grand-canonical) and nonequilibrium (*e.g.*, relaxation, Fourier’s law of heat conduction, Green–Kubo relations), as is done for simpler (and in many cases more abstract) CA models[8, 9, 27, 28, 29, 30, 31, 32].

On the other hand, conservation of momenta does not hold because of the TKE inversion in the translational permutation (11), as mentioned in section 3.4.1. (Angular momenta are not conserved either, because the rotational permutation (19) also contains uncompensated inversion of RKE.) From the macroscopic viewpoint, this non-conservation of momenta seems to work positively to enhance the model’s ergodicity, instead of the effect of chaos dynamics, which discrete CA models lack.

4 Simulation

In this section, we demonstrate by simulation that the RLMA can reproduce the original LMA’s self-organization results[3] as special cases. We also show that the RLMA reproduces results which are qualitatively consistent with the traditional Larson-type models. More extensive results and their statistical treatment will be given in a future work.

In the following simulations, the parameters are set as follows: $H_{\text{max}} = 8$, $V_{\text{WH-WH}} = V_{\text{WO-WO}} = V_{\text{WO-IP}} = V_{\text{IP-IP}} = +4$, $V_{\text{WH-WO}} = V_{\text{WH-IP}} = -4$, $V_{\text{WH-WN}} = V_{\text{WH-IN}} = V_{\text{WH-O}} = V_{\text{WO-WN}} = V_{\text{WO-IN}} = V_{\text{WO-O}} = V_{\text{IP-WN}} = V_{\text{IP-IN}} = V_{\text{IP-O}} = V_{\text{O-O}} = -1$. The simulations in section 4.1 and 4.2 adopted lattice space consisting of $N = 24 \times 24$ cells, while the simulations in section 4.3 used lattice space of $N = 100 \times 100$ cells. Periodic boundary condition is applied in all the simulations, so the systems are isolated.

4.1 Hydrophobic monomers in a polar environment

Fig. 10 shows snapshots of the molecular layer in a simulation of a mixture of water and hydrophobic monomers (25% water, 25% hydrophobic monomer, 50% vacuum). Starting from a homogeneously mixed initial configuration with no heat particles (Fig. 10(a)), clustering and phase separation gradually take place (Fig. 10(b), (c)), accompanied by emission of heat particles (not shown in the figures).

Note also that phase separation takes place in spite of the setup that the induction-based forces $v_{\text{WO-H}}$ and $v_{\text{WO-O}}$ between a hydrophobic monomer and a water molecule are set equal to the dispersion interaction force v_{OO} between two hydrophobic monomers, and they are much weaker than the water–water

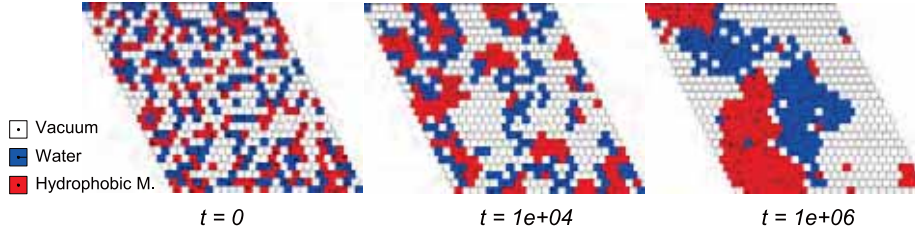


Figure 10: Snapshots of the molecular layer in a simulation of a water–hydrophobic monomer system. The molecules cluster preferentially with those of the same type, and phase separation occurs.

binding $v_{\text{WH-WO}}$, as is the case in Ref. [3] (see also section 2.3). Since the system is isolated, this self-organization process is *entropy-driven*.

Fig. 11 shows the time evolution of mean energies per cell—TKE (sum for all of the principal directions $\langle \sum_{l \in L} tke_{i,l} \rangle_i$), RKE (absolute value $\langle |rke_i| \rangle_i$), potential energy (sum for all of the principal directions $\frac{1}{2} \langle \sum_{l \in L} V^{i,l} \rangle_i$), heat particles (sum for all of the principal directions $\langle \sum_{l \in L} h_{i,l} \rangle_i$)—in the simulation run of Fig. 10. In this relaxation process, as the molecules are organized into

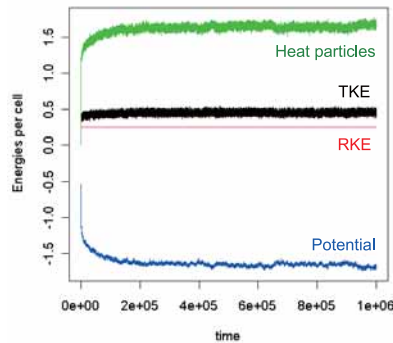


Figure 11: Time evolution of mean values of TKE, RKE, potential energy, and heat particles per cell in a simulation of a water–hydrophobic monomer system.

a more stable configuration, the energy released from the molecular layer is transferred into the heat particle layer, with the total energy conserved (mean total energy per cell, $e_{\text{total}} = E_{\text{total}}/N$, is 0.68). It is observed that a large part of the energy transfer takes place in the first few thousand steps. This corresponds to quick dissolution of high-potential, unstable partial configurations.

Fig. 12 shows the time evolution of mean numbers of neighboring molecules

of the same types (water and hydrophobic monomer)—calculated as $\langle |\{l(i) | mt_{l(i)} = X\}| \rangle_i$ s.t. $mt_i = X$ for $X = W, O$, respectively—in the same simulation. The mean neighboring molecules of the same types start from the initial random

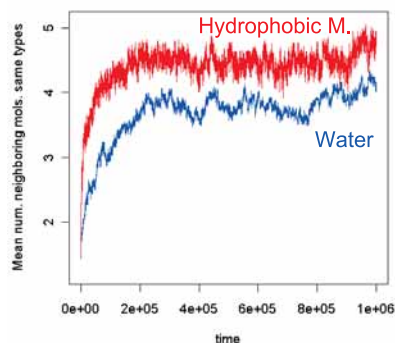


Figure 12: Time evolution of mean numbers of neighboring molecules of the same types (water and hydrophobic monomer) in the simulation of a water–hydrophobic monomer system.

configuration (where the value $\sim 0.25 \times 6 = 1.5$ for both water and hydrophobic monomers) and increase relatively slowly, taking a few million steps to reach the equilibrium state. This result is consistent with observations of the physico-chemical molecular aggregation process, where small clusters are quickly formed, but as the size grows, their mobility decreases and integration into larger clusters requires more time.

4.2 Amphiphilic polymers in a polar environment

Fig. 13 shows snapshots of the molecular layer in three simulations of amphiphilic tetramers (each consisting of three hydrophilic monomers plus one hydrophobic head monomer, see Fig. 5) in solvent water, with different settings for the initial distribution of heat particles.

In the simulation of Fig. 13(a), initially, there are no heat particles, representing the “low-temperature” condition (mean total energy per cell $e_{\text{total}} = 0.95$). Although the low-temperature condition is the same as the one adopted in the simulation of Fig. 10, this simulation requires a longer relaxation time, because the polymers’ mobility is lower than that of the monomers (mainly because of the bond maintenance condition (13)). Starting from the initial condition where the tetramers are homogeneously distributed, they aggregate into micelle-like structures, their hydrophilic heads staying in contact with water and their hydrophobic tails trying to cluster. The micelle-like structures are an elementary example of *higher-order* structures[1], with emergent properties such as integrity

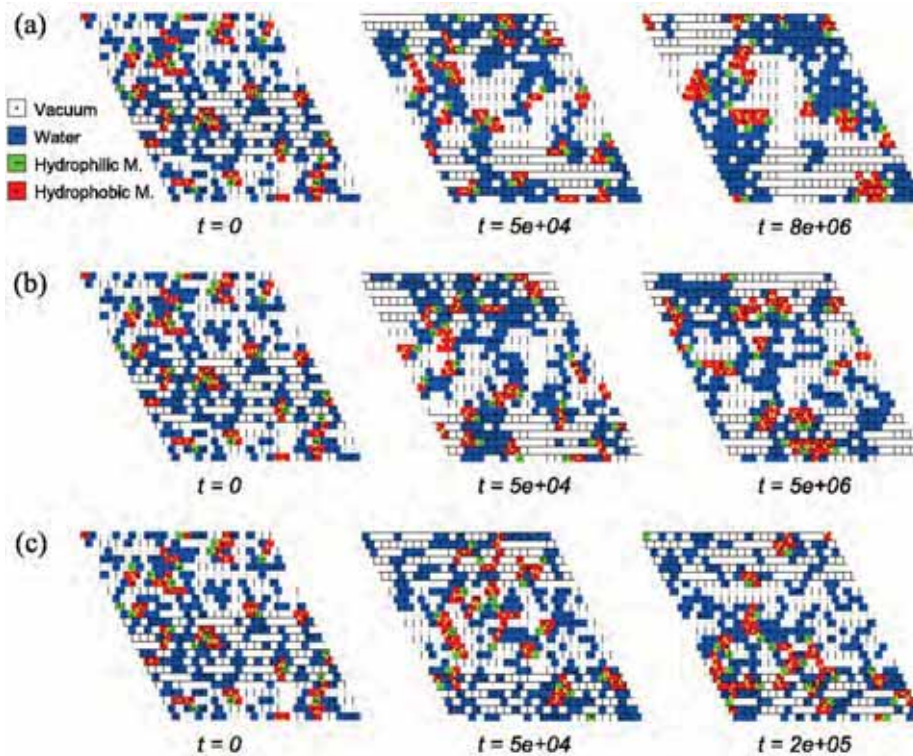


Figure 13: Snapshots of the molecular layer in three simulations of water-amphiphilic polymer systems with different initial distributions of heat particles (“temperature”): (a) low-, (b) moderate-, and (c) high-temperature conditions.

and even lower mobility.

Fig. 13(b) corresponds to the “moderate-temperature” condition, where the initial $h_{i,l}$ is given randomly from $[0, 1]$ with $\langle h_{i,l} \rangle_i = 1$ for $l \in L$ (mean total energy per cell $e_{\text{total}} = 3.93$). Compared with the low-temperature condition, while the sizes of the organized micelle-like structures and water aggregates become smaller, their motion becomes faster.

Fig. 13(c) corresponds to the “high-temperature” condition, where the initial $h_{i,l}$ is given randomly from $[0, 4]$ with $\langle h_{i,l} \rangle_i = 2$ for $l \in L$ (mean total energy per cell $e_{\text{total}} = 13.01$). In this condition, the molecular motion becomes even faster and no distinct self-organization is observed.

Fig. 14 shows the time evolution of mean energies per cell, and Fig. 15 shows the time evolution of mean numbers of neighboring molecules of the same types (water and hydrophobic monomer) in the three abovementioned simulations with the different temperature conditions. Note the difference in the time scales. These results indicate the temperature dependency of the molecular pro-

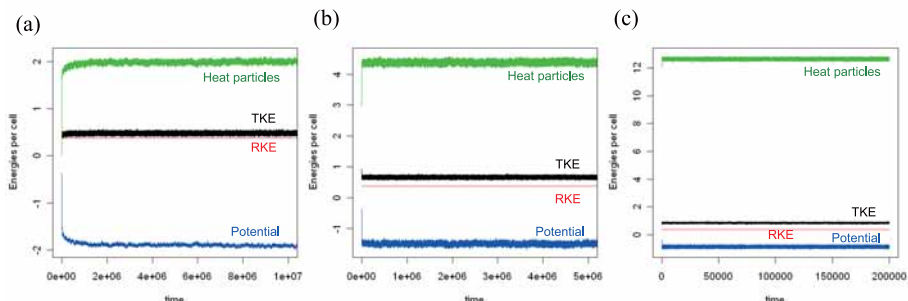


Figure 14: Time evolution of mean values of TKE, RKE, potential energy, and heat particles per cell in a simulation of water-amphiphilic polymer systems in the different temperature conditions: (a) low-, (b) moderate-, and (c) high-temperature conditions.

cess. That is, at lower temperature, polymers aggregate into larger structures; however, the formation process takes a longer time. On the other hand, at higher temperature, large structures cannot be maintained while the motion of polymers gets faster. This kind of temperature dependency is derived (rather than being presupposed) in a precise manner only from dynamical models with reversibility and energy conservation. Fig. 15 (especially (a)) also shows that the aggregation of polymers is slower than the clustering of water.

4.3 Phase separation dynamics in ternary mixtures

To compare in more detail the behavior of our RLMA with experimental observations and other models (especially the Larson-type ones), we conducted simulation of ternary mixtures of water, hydrophobic monomers, and amphiphilic polymers, and analyzed the phase separation dynamics with different concentration and temperature (total energy) settings.

Theories as well as successful models have shown that the phase separation or domain growth dynamics generally obeys dynamic scaling[33, 15, 34, 36, 22], where domain structure remains statistically invariant in time under rescaling by the characteristic length scale L , and L grows as a function of time following the asymptotic power law, $L(t) \sim t^{1/z}$. The theories typically suggest $z = 1/3$, though the value can differ depending on the stages of phase separation.

To check if the RLMA realizes the dynamic scaling behavior, we investigated the evolution of *mean cluster radius*. A molecule of type X (in this case, X can be water W , hydrophobic monomer O , or amphiphile A) belongs to a cluster of type X if any of its nearest neighbor are of the same type and are already counted as part of the cluster. Using the cluster distribution $\{n_X(s)\}_s$, where $n_X(s)$ is the number of type X clusters with size s , the mean cluster size χ_X of

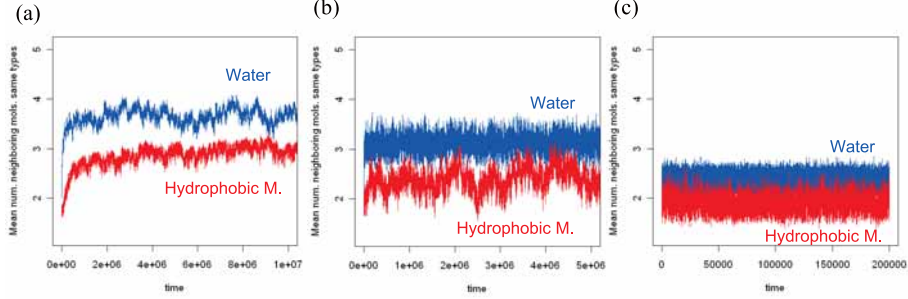


Figure 15: Time evolution of mean numbers of neighboring molecules of the same types (water and hydrophobic monomer) in the simulations of water–amphiphilic polymer systems with the different temperature conditions: (a) low-, (b) moderate-, and (c) high-temperature conditions.

type X is estimated as

$$\chi_X = \frac{\sum_{s=1}^{s_{\max,X}-1} s^2 n_X(s)}{\sum_{s=1}^{s_{\max,X}} s n_X(s)}, \quad (24)$$

where $s_{\max,X}$ is the largest cluster of type X . In two dimensions, the mean cluster radius of type X is estimated as $R_X \sim \chi_X^{1/2}$.

Fig. 16 shows the evolution of averaged mean cluster radius $\langle R \rangle = [\frac{1}{2}(\chi_W + \chi_O)]^{1/2}$, with different concentration ratios of water ϕ_W , hydrophobic monomers ϕ_O , and amphiphilic polymers ϕ_A (the ratio of vacuum $\phi_V = 0.4$ is common), in a temperature setting (mean total energy $e_{\text{total}} = 1.18$). Power law behavior is observed for all the concentration ratios $(\phi_W, \phi_O, \phi_A) = (0.288, 0.288, 0.024)$, $(0.27, 0.27, 0.06)$, and $(0.24, 0.24, 0.12)$. For each setting, the scaling exponent $1/z$ is estimated as 0.213 ± 0.004 , 0.199 ± 0.005 , and 0.121 ± 0.004 , by fitting the data within time region $[10000, 200000]$ into $\langle R \rangle(t) \sim t^{1/z}$. These estimated values, especially the former two ($1/z \sim 0.2$) are similar to the ones obtained by simpler Ising spin models for binary systems [34, 35, 36], but smaller than the theoretical value $z = 1/3$ which is also obtained in Ref. [22] by adding small amount of amphiphile into binary mixture, like in this simulation. The small values are possibly because the asymptotic late stage is not reached due to the small size of the system, but other possible reasons can be also suggested: (i) the existence of hydrodynamics, which is supposed to be absent in the dynamic scaling hypothesis[33] as well as the Larson-type model in Ref. [22], (ii) the constant-energy condition, where the temperature increases as the clustering proceeds and the dynamic exponent becomes smaller compared to the isothermal condition[15], while the latter is usually used in the Larson-type models and other Monte Carlo methods, and (iii) other conservation laws, which also work to decrease the exponent [36]. The decrease in the growth rate of $\langle R \rangle$

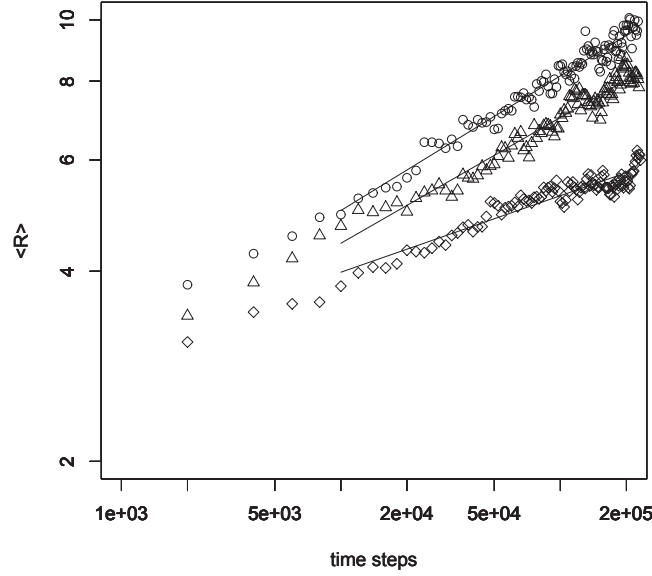


Figure 16: Time evolution of the averaged mean cluster radius $\langle R \rangle$, with different molecular ratios. \circ represents $(\phi_W, \phi_O, \phi_A) = (0.288, 0.288, 0.024)$, \triangle represents $(\phi_W, \phi_O, \phi_A) = (0.27, 0.27, 0.06)$, and \diamond represents $(\phi_W, \phi_O, \phi_A) = (0.24, 0.24, 0.12)$. The lines show power law relations with estimated scaling exponents $1/z$ for their slopes.

accompanying the increase of concentration ϕ_A of amphiphile is consistent with the result in Ref. [22].

For different temperature settings we also calculated the *equal-time structure factors* $S_X(k, t)$, which is the Fourier transform of the *equal-time pair correlation function*, defined as

$$S_X(k, t) = \int C_{XX}(\vec{r}, t) e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} d\vec{r}, \quad (25)$$

$$C_{XX}(\vec{r}, t) = \langle \delta\rho_X(\vec{r}, t) \delta\rho_X(\vec{0}, t) \rangle. \quad (26)$$

The equal-time pair correlation $C_{XX}(\vec{r}, t)$ of type X is calculated by drawing shells of radius r and $r + 1$ around each molecule of type X , counting the number of the same type molecules between the shells, and finally normalizing by dividing by r .

Fig. 17 shows the equal-time water–water structure factor $S_W(k, t)$ for a system with $(\phi_W, \phi_O, \phi_A) = (0.288, 0.288, 0.024)$ and different temperature (total energy) settings. In the lower temperature settings as Fig. 17(a) and (b) (mean

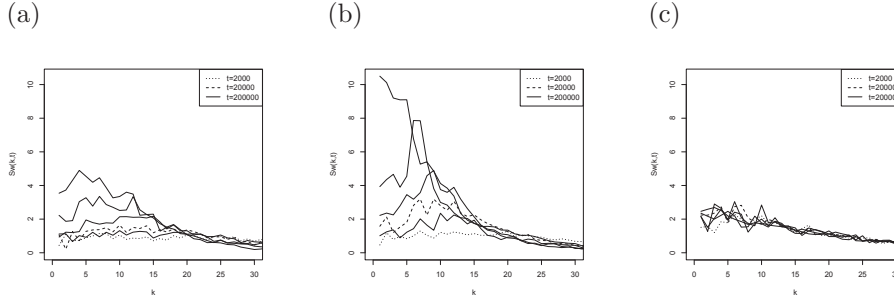


Figure 17: The equal-time water–water structure factor for a system with $(\phi_W, \phi_O, \phi_A) = (0.288, 0.288, 0.024)$ and different temperature (total energy) settings: (a) $e_{\text{total}} = 0.37$, (b) $e_{\text{total}} = 1.18$, (c) $e_{\text{total}} = 5.63$. $S_W(k, t)$ at times $t = 2, 10, 20, 50, 100, 200 \times 10^3$ are shown.

total energy $e_{\text{total}} = 0.37$ and $e_{\text{total}} = 1.18$, respectively), the structure factor develops a peak at nonzero wave number that grows in time and the position of the peak moves to lower k as t increases. The peak at $k \sim 1$ indicates that the system is approaching to a global separation into spanning networks. The growth rate of the peak is higher for the “warm” condition $e_{\text{total}} = 1.18$ than the “cool” condition $e_{\text{total}} = 0.37$. Above a critical total energy (that corresponds to the *demixing temperature*), as Fig. 17(c) ($e_{\text{total}} = 5.63$), the structure factor does not show any structure. These are again in good agreement with the result in Ref. [22], as well as experiment[37].

5 Conclusion

In this paper, we described the construction of RLMA, which simulates physico-chemical interaction of molecules and their self-organization process. The definition of the model has shown how to eliminate the irreversibility in the original LMA using several techniques to construct reversible CA. Simulation results of RLMA dynamics have demonstrated that the RLMA can deal with broader situations, with the original LMA’s self-organization results as special cases. The results also showed that the RLMA reproduces qualitatively consistent results with the traditional Larson-type models.

Although several reversible CA models have been proposed to simulate self-organization processes[8, 9], to our knowledge, this is the first deterministic CA model that simulates self-organization of *higher-order* structures, while satisfying strict reversibility.

Reversibility and conservation laws of the model enable precise application and validation of the various methods in both equilibrium and nonequilibrium statistical mechanics. Reversibility also enables rigorous tracking of the information flow driven by the dynamics, with no veiled sources or sinks. Therefore,

the model will be preferable in analyzing the self-organization and dynamics of multiple levels of structures from an information-theoretic viewpoint (*e.g.*, Ref. [2]), as well as from the physically grounded viewpoint.

This study focused on the process of molecular assembly. However, the model can be extended to incorporate chemical reactions and catalytic effects, by introducing more types of molecules and setting proper values of excitation energies for the reactions, with their modulation in the existence of neighboring catalytic molecules. We are currently working on the construction of such a reversible and thermodynamically consistent model that realizes “protocells” [6] with self-maintenance of compartment structures, metabolism, and self-reproduction.

Acknowledgments

This study was in part supported by “Symbiotic Information Technology Research Project” of Tokyo University of Agriculture and Technology, and also by the Grant-in-Aid for “Scientific Research on Priority Areas (Area No. 454)” from the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology.

A Alternative implementation of molecular rotation

Here, we present an alternative rotation rule, which enables the stationary state $rke = 0$ for the polar molecules. Using the same interleaved scheme of Fig. 9, the rotational permutation ρ of (19) is replaced by the new conditional permutation ρ_a defined below.

First, consider that a polar molecule at \mathbf{i} is rotating, *i.e.*, $rke_{\mathbf{i}} \neq 0$. Then, ρ_a maintains the rotation and changes the molecule’s orientation by $\Delta^{\text{sgn}(rke_{\mathbf{i}})}$ ³ if the magnitude of $rke_{\mathbf{i}}$ is more than sufficient to compensate for the change in potential induced by the rotation; else, it inverts the direction of rotation if the magnitude of $rke_{\mathbf{i}}$ is not large enough. If the magnitude of $rke_{\mathbf{i}}$ is just sufficient to compensate for the potential change, ρ_a either executes the rotation and brings the molecule to the stationary state, or inverts the direction of rotation,

³The sign function, $\text{sgn}(rke_{\mathbf{i}}) = +1$ if $rke_{\mathbf{i}} > 0$, -1 if $rke_{\mathbf{i}} < 0$, indicates the direction of rotation.

depending on some conditions to avoid irreversibility:

$$\rho_a \begin{pmatrix} mo_i \\ rke_i \end{pmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \Delta^{\text{sgn}(rke_i)}(mo_i) \\ rke_i - \text{sgn}(rke_i)\delta(mo_i, \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i \end{array} \right) \quad \text{if } rke_i \neq 0 \text{ and} \\ \left\{ \begin{array}{l} |rke_i| > \delta(mo_i, \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i, \text{ or} \\ |rke_i| = \delta(mo_i, \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i \\ \wedge \delta(\Delta^{\text{sgn}(rke_i)}(mo_i), \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i \geq 0, \text{ or} \\ |rke_i| = \delta(mo_i, \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i \\ \wedge \delta(\Delta^{\text{sgn}(rke_i)}(mo_i), \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i < 0 \\ \wedge \text{parity}(pd_i) \neq \text{sgn}(rke_i), \end{array} \right\} \\ \left(\begin{array}{l} mo_i \\ -rke_i \end{array} \right) \quad \text{if } rke_i \neq 0 \text{ and} \\ \left\{ \begin{array}{l} |rke_i| < \delta(mo_i, \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i, \text{ or} \\ |rke_i| = \delta(mo_i, \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i \\ \wedge \delta(\Delta^{\text{sgn}(rke_i)}(mo_i), \Delta^{\text{sgn}(rke_i)})V^i < 0 \\ \wedge \text{parity}(pd_i) = \text{sgn}(rke_i). \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (27)$$

Next, consider that a polar molecule at i is in the stationary state, i.e., $rke_i = 0$. Then, ρ_a starts the rotation if changing the molecule's orientation by one of the directions $\Delta^{\pm 1}$ induces a negative potential change. If rotations in both of the directions $\Delta^{\pm 1}$ induce negative potential changes, ρ_a starts the rotation according to the preferential direction. On the other hand, if the molecule's orientation is at a local potential minimum, the molecule maintains its stationary state:

$$\rho_a \begin{pmatrix} mo_i \\ rke_i \end{pmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \Delta^{\pm 1}(mo_i) \\ \mp \delta(mo_i, \Delta^{\pm 1})V^i \end{array} \right) \quad \text{if } rke_i = 0 \text{ and} \\ \left\{ \begin{array}{l} \delta(mo_i, \Delta^{\pm 1})V^i < 0 \\ \wedge \delta(mo_i, \Delta^{\mp 1})V^i \geq 0, \text{ or} \\ \delta(mo_i, \Delta^{+1})V^i < 0 \\ \wedge \delta(mo_i, \Delta^{-1})V^i < 0 \wedge \text{parity}(pd_i) = \pm 1, \end{array} \right\} \\ \left(\begin{array}{l} mo_i \\ 0 \end{array} \right) \quad \text{if } rke_i = 0 \text{ and} \\ \delta(mo_i, \Delta^{+1})V^i \geq 0 \wedge \delta(mo_i, \Delta^{-1})V^i \geq 0. \end{array} \right. \quad (28)$$

Here

$$\delta(k, \Delta^n)V^i = \sum_{l \in L} \delta(k, \Delta^n)V^{i,l(i)} \quad (29)$$

represents the total potential change at i that occurs when the orientation of the molecule at i is changed from k to $\Delta^n(k)$ (see the notation (20), too).

The main point is that, in ρ_a , change in RKE and not heat compensates for the change in potential. Therefore, the RKE layer can work as another energy storage. Recall that in the rotation rule (19), RKE works just as "second-order" signals to preserve reversibility; hence, it cannot change to 0. It should also be noted that the parity (7) of the preferential direction is utilized to avoid non-

uniqueness of the ρ_a 's pre-images, which could be derived from unstable fixed points (stationary states at orientations of local maximum potential).

One drawback of this alternative rotation rule is that the value of RKE is unbounded in principle; thus, the model is not a CA in the strict sense. In practice, however, due to the energy conservation (23), limitless divergence of RKE cannot occur unless an infinite amount of energy is injected into a finite region.

The RLMA model with the alternative rotation permutation ρ_a shows qualitatively similar behavior. Fig. 18 shows snapshots of the molecular layer, Fig. 19 shows the time evolution of mean energies per cell, and Fig. 20 shows the time evolution of mean numbers of neighboring molecules of the same types in a simulation of a water–hydrophobic monomer system, with the same initial configuration as that in section 4.1.

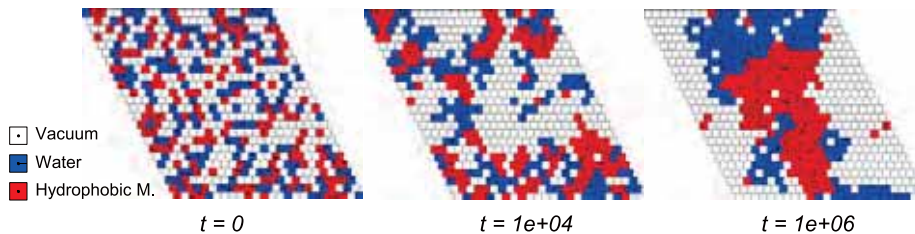


Figure 18: Snapshots of the molecular layer in a simulation of a water–hydrophobic monomer system, using the alternative rotation rule ρ_a . Clustering and phase separation occur in a similar manner to those shown in Fig. 10.

References

- [1] S. Rasmussen, N. A. Baas, B. M. M. Nilsson, and M. W. Olesen, *Artif. Life* **7**, 329 (2001).
- [2] S. McGregor and C. Fernando, *Artif. Life* **11**, 459 (2005).
- [3] B. Mayer, G. Köhler, and S. Rasmussen, *Phys. Rev. E* **55**, 4489 (1997).
- [4] B. Mayer and S. Rasmussen, *Int. J. Mod. Phys. C* **9**, 157 (1998).
- [5] B. Mayer and S. Rasmussen, *Int. J. Mod. Phys. C* **11**, 809 (2000).
- [6] N. Ono, *BioSystems* **81**, 223 (2005).
- [7] T. J. Hutton, *Artif. Life* **13**, 11 (2007).
- [8] M. Creutz, *Annals of Physics* **167**, 62 (1986).
- [9] R. M. D’Souza, *Phys. Rev. E* **60**, 264 (1999).

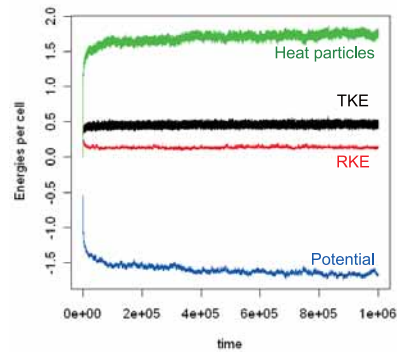


Figure 19: Time evolution of mean values of energies per cell in a simulation of a water-hydrophobic monomer system, using ρ_a . The mean absolute value of RKE $\langle |rke_i| \rangle_i$ fluctuates; this is in contrast to Fig. 11 where the value is constant.

- [10] T. Toffoli and N. Margolus, *Physica D* **45**, 229 (1990).
- [11] T. Toffoli, S. Capobianco, and P. Mentrasti, *Theor. Comput. Sci.* **325**, 329 (2004).
- [12] J. Hardy, Y. Pomeau, and O. de Pazzis, *J. Math. Phys.* **14**, 1746 (1973).
- [13] U. Frisch, B. Hasslacher, and Y. Pomeau, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 1505 (1986).
- [14] K. Morita and M. Harao, *Trans. IEICE Japan* **E72**, 758 (1989).
- [15] S. W. Koch, R. C. Desai, and F. F. Abraham, *Phys. Rev. A* **27**, 2152 (1983).
- [16] R. G. Larson, L. E. Scriven, and H. T. Davis, *J. Chem. Phys.* **83**, 2411, (1985).
- [17] R. G. Larson, *J. Chem. Phys.* **89**, 1642, (1988).
- [18] R. G. Larson, *J. Chem. Phys.* **91**, 2479, (1989).
- [19] D. Stauffer, N. Jan and R. B. Pandey, *Physica A* **198** 401 (1993).
- [20] M. Sahimi and P. Nowroozi, *Phys. Rev. Lett.* **73** 1182 (1994).
- [21] T. B. Liverpool and A. T. Bernardes, *J. Phys. (France) II* **5** 1457 (1995).
- [22] A. T. Bernardes and T. B. Liverpool and D. Stauffer, *Phys. Rev. E* **54** R2220 (1996).

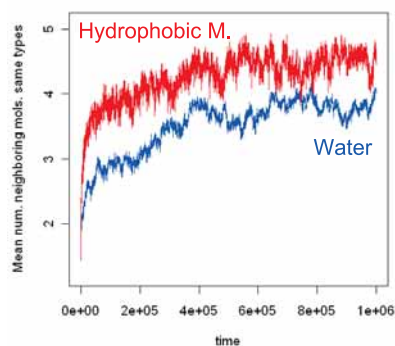


Figure 20: Time evolution of mean numbers of neighboring molecules of the same types in the simulation of a water–hydrophobic monomer system, using ρ_a . The evolution is similar to that shown in Fig. 12.

- [23] P. L. Privalov and S. J. Gill, *Pure Appl. Chem.* **61**, 1097 (1989).
- [24] B. Chopard, *J. Phys. A: Math. Gen.* **23**, 1671 (1990).
- [25] S. Marconi, Ph.D. thesis, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, 2003.
- [26] J. T. A. Witten and L. M. Sander, *Phys. Rev. Lett.* **47**, 1400 (1981).
- [27] S. Takesue, *Physica D* **45**, 278 (1990).
- [28] S. Takesue, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 252 (1990).
- [29] S. Takesue, *Physica D* **103**, 190 (1997).
- [30] T. Niwa, *J. Stat. Phys.* **89**, 801 (1997).
- [31] K. Saito, S. Takesue, and S. Miyashita, *Phys. Rev. E* **59**, 2783 (1999).
- [32] D. Stauffer, *Comput. Phys. Commun.* **127**, 113 (2000).
- [33] K. Binder and D. Stauffer, *Phys. Rev. Lett.* **33**, 1006 (1974).
- [34] J. Amar, F. Sullivan, and R. D. Mountain, *Phys. Rev. B* **37**, 196 (1988).
- [35] S. C. Glotzer, D. Stauffer, and N. Jan, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 4109 (1994).
- [36] T. B. Liverpool, *Physica A* **224**, 589 (1996).
- [37] F. Mallamace, N. Micali, S. Trusso, and S. H. Chen, *Phys. Rev. E* **51**, 5818 (1995).

連続体上の計算概念について

-再帰関数を超えるもの-

八杉満利子（原稿）

1 序文

1.1 背景

近年、数学における計算可能性問題が、数学研究において重要なテーマになってきている。最初は離散構造上の（自然数上の、と考えてよい）計算概念について論じられていた。離散構造上の計算可能性概念は、たとえば再帰関数論あるいはチューリング機械理論等によって表現されている。どの理論でも「計算可能性」は明確に定義されており、また数学的にはすべて相互に同値である。離散構造上の計算概念はこれら（のそれぞれ）によって尽くされている、という「チャーチのテーゼ」は広く認められている。人がこれらを「計算」と呼ぶのは各人にとって、少なくともその一つが「計算」という感覚に合致しているからだろう。ここでは再帰関数を採用する。

その後連続体上の「計算可能性」が論じられ、解析学における計算可能性構造の研究が進んだ。ここでは実数体に話を限定する。

数学における計算可能性の特性は、入力の情報から出力を求めるプロセスとして決定論的なものが存在することである。数学的にはこの条件を、後述するように、「列計算可能性」によって表す。

実数および実数上の連続関数の計算可能性概念については、2節の定義が計算の意味を適切に表現するものとして合意されており、それに基づく数学の実行によってその妥当性が十分検証されている。

実数においても連続関数においても、計算可能性の基礎になるのは再帰関数であり、有理数列、諸々の収束率や関数の連続率などが再帰関数で与えられる。

しかし、科学・技術において有用な不連続関数は多数あり、それらの計算も普遍的な問題である。不連続関数の計算可能性の基礎としては再帰関数のみでは不十分で、何らかの拡張が必要である。そのための理論は多数提案されてきた。それらは数学的には適当な条件の下で同値になるが、一意的な計算可能性概念は確定していないのである。

ここではそれらのうちの二つの方法、すなわち「極限再帰関数による収束

率の容認」と「関数の定義域の位相の変更」について解説し、それらにおける「計算概念」について検討する。

1.2 計算とは

本論に入る前に、連続体上の計算可能性問題において何を計算と考えるか、あるいは何を計算と感じるか、について考えておきたい。

まず基本になる再帰関数の特性を考えよう。再帰関数とは大まかにいえば計算プログラムが書ける離散構造上の関数である。一步一步の計算が実行され、やがて計算が停止して答えが出力される。人はこのように、一步一步の結果とともに「有限回で求める値に到達する保証」があれば、そのプロセスを「計算」として受け入れる。

再帰関数とチューリング機械による計算が同値であることは数学的な事実であるが、両者は「計算感覚」として同じではない。それにも関わらずその差異について議論されないのは、経験的に両者間の変換に慣れ親しんでいるからだと考えられる。以後の議論でも「慣れ親しみ感」は重要な要素である。

再帰関数は本来自然数上で定義されるが、その定義は整数、有理数などに拡張できる。

実数および実数上の連続関数の計算可能性は、それらの通常の見方において、有理数列、諸々の収束率や連続率などをすべて再帰関数に限定することによって得られる。たとえばある実数が計算可能とは、それを近似する（それに収束する）再帰的有理数列があつて、その近似の精度（近似率あるいは収束率と呼ばれる）が再帰関数で与えられることである。整数、有理数、数学でよく知られている $e, \pi, \sqrt{2}$ などの無理数は計算可能である。この計算可能性の定義は容易に実数の列に拡張することができる。

不連続関数は「連続でない」という以外の特性を持たない。たとえば連続関数の連続率に対応するような量も定義できない。そのため不連続関数の計算概念は一通りには決まらず、各方法論に依存して定義されることになり、その都度「何をもちて計算と呼ぶか」を検討する必要があるのである。

不連続関数の計算可能性の基礎としては再帰関数の極限をとること、あるいは関数の定義域の位相の変換など、再帰性を超える原理を必要とする。これらを計算としてみようとする場合に何が問題になるか、が本論の主要内容である。どちらも前述のような再帰関数の有限的な「計算感」からの飛躍であるが、「慣れ親しむ」ことによって「再帰性の延長上にある計算」として容認できる範囲にはあると思われる。これらの意味は、以後の各節での計算可能性に関する解説の後に、より明確になるであろう。

ここで一点注意しておきたい。我々は通常の古典数学に携わっているのであつて、いわゆる構成的数学とは立場が異なる。すなわち、古典数学を全面的に仮定している。たとえば実数の中での代数的数について研究するように、

普通の実数体の中での計算可能実数の構造について研究する、という立場である。

2 計算可能性の定義：実数と連続関数の場合

この節では計算可能実数および実数上の連続関数の計算可能性の定義を述べる。正確な定義の前に概観を与えておこう。

2.1 計算可能性概観

前述のようにある実数が計算可能とは、それが再帰的有理数列によって再帰的な精度をもって近似されることである。

一般に収束（近似）、連続などの度合い（収束率または近似率、連続率）が再帰関数で得られるときには、その現象を「実効的」と呼ぶ。実効性とは、計算可能性問題の再帰性への帰着を意味する。数学における種々な対象物、たとえば実数、実数列、連続関数、などの計算可能性は実質再帰的有理数列と、収束あるいは連続のいわゆる $\varepsilon - \delta$ 方式の定義の再帰性のみ依存している。後者は、 ε に対して δ を再帰的にとれる、という要請である。

実数上の連続関数の計算可能性は、列計算可能性（計算可能実数列を計算可能実数列に写す）および実効的連続性（再帰的連続率の存在）によって定義される。

以上は実数および実数列と、実数上の連続関数についての計算の意味を適切に表現するものとして、広く合意されている。列計算可能性と実効的連続性は連続関数の計算可能性のパラダイムと称してよいだろう。

2.2 計算可能性の定義

この節では計算可能実数および実数上の連続関数の計算可能性の定義を述べる。

実数の概念は、有理数のコーシー列あるいは有理数のデデキント・カットなどで表現される。計算可能性の定義ではどの表現についても同値になることが知られている ([5]) が、有理数のコーシー列が扱いやすい。すなわち実数 x について、

- (A) (i) ある有理数のコーシー列 $\{r_n\}$ があって、
(ii) x はそれによって近似される。

(ii) を詳しく書くと、「任意の p に対して N が存在して、 $n \geq N$ ならば $|x - r_n| < \frac{1}{2^p}$ が成り立つ」となる。 p, N, n は自然数を表す変数である。(A) を「計算」の立場から表現しなおすと、次の (B) になる。

- (B) (i) n に対して r_n を計算する方法が存在する。
(ii) $\{r_n\}$ の x への近似の精度 (近似率あるいは収束率) の計算方法が存在する。

(B) の数学的な記述は次の (C) になる。

- (C) (i) $\{r_n\}$ は (自然数から有理数への) 再帰関数である。
(ii) ある再帰関数 α が存在して、任意の p と任意の $n \geq \alpha(p)$ について、 $|x - r_n| < \frac{1}{2^p}$ が成り立つ。

(ii) は、いわゆる $\varepsilon - \delta$ 方式の条件において ε に対して δ (この場合には p に対して N) を与える計算方法の存在を要求するものである。古典的な実数の性質 (A) から実効的な条件 (B) または (C) への移行を「実効化」と呼ぶ。また、(ii) の条件を満たす近似を「実効的近似」という。

他の計算可能性定義においても実効性および実効化の構造は同様である。

実数の計算可能性の定義は実数列 $\{x_m\}$ に対して自然に拡張される。

実数関数 f が (実数全体で) 連続である、とは、

- (D) (i) 任意の実数 x に対して関数値 $f(x)$ が定まり、
(ii) 連続の性質が成り立つ。

(ii) はいわゆる $\varepsilon - \delta$ 方式で表現されるものであるが、後のために次のような同値な表現を採用する：

任意の p, k に対して N が存在して、 $x, y \in [k, k+1]$ で $|x - y| < \frac{1}{2^N}$ ならば $|f(x) - f(y)| < \frac{1}{2^p}$ が成り立つ。

(D) の実効化は次のように述べることができる。

- (E) (i) ある計算方法があつて、任意の計算可能な実数 x に対して、その方法によって計算可能実数 $f(x)$ を得ることができる。
(ii) 連続率 N の計算方法が存在する。

(E) をもって連続関数 f の計算可能性と考え、数学的には次の (F) で表現する。

- (F) (i) (列計算可能性) f は計算可能実数列 $\{x_n\}$ を計算可能実数列 $\{f(x_n)\}$ に写す。

(ii) (実効的連続性) f に対して再帰的な連続率 β が存在する：

すべての p, k に対して $x, y \in [k, k+1]$ で $|x - y| < \frac{1}{2^{\beta(p,k)}}$ ならば $|f(x) - f(y)| < \frac{1}{2^p}$ が成り立つ。

前述のように、数学でよく使われる実数は計算可能であり、教科書で見るとような数列は計算可能である。加減乗除、三角関数、指数関数、対数などよく知られている関数は、その定義域上で計算可能である。

3 不連続関数についての反例

不連続関数の計算可能性については、当然ながら連続性に基づく定義を適用するわけにはいかないので、実効的連続性の条件は論外である。しかしせめて、列計算可能性は計算可能性の一条件とできないだろうか？この期待が裏切られる例を以下で説明する。ここでどのような不連続関数を計算可能と認めたいか、という問題があり、それによってこの反例の意味も変わるが、不連続関数の計算可能性についての多くの理論において計算可能であることが示され、かつ素朴な意味でも計算可能と感ぜられる例を扱う。

$[x]$ は最大整数値関数、あるいはガウス関数と呼ばれ、 x を越えない最大整数を与える。関数値が各整数点で飛躍するので不連続であるが、右連続ではある。個々の関数値は整数なのだから当然計算可能である。後で説明するように、我々は関数として $[x]$ は「計算可能」だという感覚をもつ。他方列計算可能性が成り立たないという意味で、一般的定義によれば、 $[x]$ の値の計算方法はない。ガウス関数は計算可能性についての、数学的な定義と人の感覚のずれを示す例といえるが、人の感覚による計算可能性を何らかの形で反映させる方法を 4 節で提示する。

ガウス関数についての列計算可能性の反例を [8] から引用しておく。

a は 0 を値としてとらない再帰的単射 (1 対 1 関数) で、値の集合 ($Ran(a)$ と書く) が再帰的でないものとする ([4])。 $\{x_n\}$ は次のような計算可能実数列とする。(実際には有理数列である。)

$$x_n = \begin{cases} \frac{1}{2^m} & n = a(m) \text{ のとき} \\ 0 & \text{そのような } m \text{ がないとき} \end{cases}$$

これを使って、別の計算可能実数列 $\{y_n\}$ を $y_n = 1 - x_n$ と定義する。このとき

$$y_n = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2^m} & n = a(m) \text{ のとき} \\ 1 & \text{そのような } m \text{ がないとき} \end{cases}$$

となり、したがって

$$[y_n] = \begin{cases} 0 & n = a(m) \text{ のとき} \\ 1 & \text{そのような } m \text{ がないとき} \end{cases}$$

が成り立つ。ここで $\{[y_n]\}$ が計算可能実数列であると仮定すると、 $Ran(a)$ が再帰的になることが示される。すなわち、 $[y_n] < \frac{1}{2}$ ならば $n \in Ran(a)$ であり、 $[y_n] > \frac{1}{2}$ ならば $n \notin Ran(a)$ である。仮定によれば前提条件は再帰的なので、 $Ran(a)$ が再帰的になる。これは a の条件に矛盾する。したがって、計算可能な入力 $\{y_n\}$ に対して関数値の列 $\{[y_n]\}$ は計算可能列ではない。

他方、人はガウス関数を「計算」するのだ。たとえば、まず各整数点 n を認識し、関数値 $[n] = n$ を計算する。そしてこれを基に $n < x < n + 1$ について関数値 $[x] = n$ を計算する。この「計算」はどのような原理にしたがっているのだろうか。このことについて以下で考察していく。

なお、この例で分かるように、個々の関数値の計算可能性と、その計算方法の存在とは別のことなのである。また、有理数列 $\{x_n\}$ は実数列として計算可能であるが、有理数列としては再帰的ではない例である。

4 不連続関数の計算可能性について

「不連続関数の計算可能性」は、当然ながら連続性に基づく定義が適用できないので、2.2節の定義の多少の変更によって得る、というわけにはいかない。さらに3節で見たように、列計算可能性も一般には成立しないが、それでも人はある種の不連続関数について「計算可能」感をもっている。

不連続関数の計算可能性理論は多数提案されてきた。そのなかでも、(不連続関数を含む)「計算可能な関数の族」の作る数学的構造の研究を目的とする、M.B. プール・エルが提唱した、「実効的関数空間論」が数学者にとっては魅力的である。その理論では空間の1要素としての(不連続)関数の計算可能性を定義する([5],[9])。この方針によれば再帰関数の定義とそのいくつかの初等的な性質の理解以外は通常の数学の知識と技術によって(不連続関数の)計算可能性の研究を進めることができる。

この方法論は有効でまた美しく、解析学における計算可能性問題について多くの成果をあげてきた。しかし関数空間論とは、一般に関数の不連続点における挙動を無視して、ある区間内での関数の平均的挙動を扱うものである。他方具体的な不連続関数については多くの場合、不連続点での関数値は容易に計算できるものであり、人はまずそれを計算する。私は、このような人間の知的行為を数学的に表現することが、数学における計算可能性問題の特性を示すことである、と考えている。その目標に向かっているときに自然に行き着いたのが、「極限再帰関数」および「実効的一様位相」を使う手法であった。

不連続関数の不連続点における関数値の計算には一步一步感は希薄であるが、実際に計算している、という事実はある。これを従来の計算論で基礎付けようとする、極限再帰性あるいは位相の変換のように、伝統的な計算論からの「飛躍」を認めなければならない。飛躍を含めたプロセスを「計算」と認識できるか、また、その認識は何に基づくものか、などの疑問がわき、簡単には決着がつかない。

以下では、連続関数の計算可能性を基本にして、不連続関数の計算可能性についての二つの視点を紹介し、その意義と問題点を検討していきたい。

4.1 極限再帰性

3節の反例 $\{y_n\}$ について、なんらかの「計算」の意味を与えてみよう。[8]で連続関数の場合に習って $[x]$ の計算を試み、再帰関数に何を付け加えるべきか、を分析している。まずその概要を述べよう。

任意の計算可能な実数 x について x が再帰的有理数列 $\{r_k\}$ と再帰的収束率 α で表現されるものとするとき、その情報を使って $n-1 < x < n+1$ となる整数 n を求める計算方法が存在する。たとえば $n=0$ としよう。次のような性質 $R(p)$ を考える。

$$R(p) \equiv r_{\alpha(p)} < -\frac{1}{2^p}$$

$R(p)$ は再帰的に判定できる。このとき再帰的自然数列 $\{N_p\}$ を次のように定義する： $R(p)$ が成り立つとき $N_p = 1$ 、成り立たないとき $N_p = 2$ 。（ N_p の値は相異なる自然数であれば何でもよい。）さらに、 N_p が決まるごとに $N_p = 1$ ならば $s_p = -1 + \frac{1}{2^{p+1}}$ 、 $N_p = 2$ ならば $s_p = \frac{1}{2^{p+1}}$ と定義すると、 $\{s_p\}$ は再帰的な有理数列である。

$R(p)$ がどこかの $p = p_0$ で成り立てば p_0 以上の任意の q についても $R(q)$ は成り立つ。したがって N_p は最終的に安定して値 1 をとる。もしそのような p がなければ、 N_p は最初から安定して値は 2 である。これらの安定値を整数列 $\{N_p\}$ の極限と定義し、 $\lim_p N_p$ と書く。極限値は 1 か 2 に確定する。極限値が 1 ならば $[x] = -1$ であり、2 ならば $[x] = 0$ である。いずれにしても再帰的有理数列 $\{s_p\}$ は $[x]$ を近似する。

この場合の近似率はどうなるか？ $\lim_p N_p = 1$ の場合には $R(p)$ が成り立つ最初の $p = p_0$ が近似率になる。 $\lim_p N_p = 2$ の場合には最初から正しい値に行き着いているので、近似率は 1 でよい。 $\lim_p N_p$ が 1 の場合、2 の場合、それぞれの中では近似率は再帰的に求まる。

以上のことから、もしも再帰関数 $\{N_p\}$ について極限値をとる操作を計算過程として容認するならば、 $[x]$ は再帰的有理数列 $\{s_p\}$ によって近似され、近似率は $\lim_p N_p$ の値にしたがって再帰的に決まる。言い換えると、 $\{s_p\}$ の $[x]$ への収束率 $\{N_p\}$ の極限値に関して再帰的（recursive in $\lim_p N_p$ ）となる。

もしも x がたとえば事実上 $-1 < x < 0$ であるならば、前述の計算は有限回で $R(p)$ に行き着き、連続関数の関数値の計算と同様になる。すなわち、この方法での $[x]$ の関数値の計算は、形式的には連続関数の場合の計算方法を実行し、結果として極限で計算が終了する形になっている。

1 個の計算可能な実数 $[x]$ について説明したが、以上の議論は x の特殊性に依存しないものなので、計算可能実数列 $\{x_m\}$ について同様の考察ができる。そのときには $\{N_{mp}\}$ と $\{s_{mp}\}$ が m にも依存して決まる。

一般に再帰関数 $\gamma(m, p)$ について $p = 0, 1, 2, \dots$ と計算を進めるときに、もしもある p_0 から先は一定の値であるときにはその値を $\gamma(m, p)$ の p に関する極限とよび、 $\lim_p \gamma(m, p)$ と表す。結果は m の関数であり、極限再帰関数と呼ばれる。 γ が p のみの関数であるときには極限値は定数になる。

極限再帰関数を使えば、ガウス関数の列計算可能性は次のように表現される。「任意の計算可能実数列 $\{x_m\}$ に対して関数値の列 $\{[x_m]\}$ は再帰的（2重）有理数列で近似され、その収束率は極限再帰関数で得られる。」この状況を「極限再帰的列計算可能性」と呼んでおく。

再帰関数の極限值をとるというのは便宜上の操作のように見えるが、ゴールドが学習理論のために [1] で導入した概念であり、「極限同定」と表現されている。問題は再帰関数の極限同定を計算として実感できるか、ということだ。

事実上極限が存在する場合、人間は一般にはそれと自覚できなくても、計算過程の有限時点で極限值に行き着いている。途中の関数値は不安定であっても、安定値に近づいていることは確実なのである。

以上によれば、不連続点における関数 $[x]$ の値の計算を連続関数の場合に習って実行すると、それは極限再帰的な計算過程になる。実際前述のように再帰的ではありえず、また論理的な階層としては極限再帰性はその次に位置するので、これをガウス関数の計算の基礎と考えることは妥当といえる。

極限再帰性による計算では、人は任意有限の場所での一步一步の計算手続きを持っており、極限がある場合には、実際に有限ステップで正解に到達しているが、その事実は認識できない。それでも「計算感」を持てるとすれば、意識の一部が無限遠点に飛んでいる、あるいは自分の分身が無限遠点に行っている、という感覚があるからだろう。しかし無限遠点は有限の場所にいる存在にとっては明確には把握できないものであり、一種の想像の世界である。

以上を総合すると、極限再帰性による計算について、「想像力」が計算感の基礎になり得るか、また連続関数の計算方法の単純な拡張が不連続関数の計算の意味を捉えているか、の二点が課題として残る。後者については逆に、連続関数の計算の拡張である、という意味で計算手続きとしては自然なものである、という見方もできる。

すでに述べたように、 $R(p_0)$ となる p_0 が存在する場合とそのような数が存在しない場合があり、それぞれで再帰的な近似率が存在する。このケース分けは

$$\exists p R(p) \vee \forall p \neg R(p)$$

と表現される。これは Σ_1^0 排中律である。極限再帰関数の極限同定とこの排中律は（構成的に）同値である。それぞれの場合が $\lim_p N_p = 1$ 、 $\lim_p N_p = 2$ に対応する。したがって極限再帰関数の代わりに Σ_1^0 排中律を基礎にして各場合の中で再帰的な計算をする、と考えてもよいのであるが、ここでは深く立ち入らない。

なお、[10] では [8] と同様のことをラーデマッハ関数系について検討している。さらに [11], [12], [13] などでは区分連続関数（列）、Fine 連続関数（列）、など多くの具体的な極限再帰的列計算可能関数を提示している。

4.2 実効的一様位相

立場を変えて、関数を観察する、観察者の認識を考えると、たとえば不連続点を計算とは別途に認識し、実数空間を不連続点によって分割できる。この方法で実数空間にユークリッド位相から誘導される「一様位相」を導入し、

関数の連続化ができる。(一様位相とは、距離位相と類似の性質をもつ位相である。一様位相の条件のいくつかが再帰関数によって表現されるとき、実効的一様位相と呼ぶ。) ユークリッド位相における不連続関数の計算可能性問題はこのような関数の定義域の位相の変更によって、連続関数の計算可能性問題に還元可能なのである。すなわち、(ユークリッド不連続) 関数の計算可能性を実効的一様位相における連続関数の計算可能性(列計算可能性と実効的連続性)として定義できる([6])。(この場合の列計算可能性を「一様位相的列計算可能性」と呼んでおく。)

一般論を展開する代わりにガウス関数の例で説明しよう。ある整数点 n から次の整数 $n+1$ の間の左閉・右开区間 $[n, n+1)$ を互いに孤立させる(別の空間と考える)ことによって新しい位相を導入できる。すなわち実数体を区間列 $\{[n, n+1)\}$ に分割して、各区間 $[n, n+1)$ の内部ではユークリッド距離による位相を保存するものとする。この位相が「実効的一様位相」の性質を満たし、その位相に関してはガウス関数は連続(実際には実効的に連続)になる。 $[n, n+1)$ が $x < n$ から孤立しているために、 n における関数の連続性は $[n, n+1)$ の中でのみ考えればよいからである。また、たとえば数列 $\{-\frac{1}{2^n}\}$ は $[-1, 0)$ の中であって $[0, 1)$ の中にはないので、0 に収束しない。このような状況のために、前節の計算可能実数列 $\{x_n\}$ は新位相では計算可能とはならず、したがって反例 $\{y_n\}$ はここでは考慮の対象とならない。実際にガウス関数はこの位相では列計算可能性も満たすのである。

不連続点を認識しそれを基に位相の変換を行うプロセスあるいは(知的)行為は、計算そのものとは別の行為とみなされる。このプロセスは通常の数学であり、数学者にとって自然なことである。位相の変換後は再帰関数による収束率と連続率さえ求められればよい。その意味で、一様位相による不連続関数の計算可能性問題の扱いは、人の思考により近いといえる。

ここで問題になるのは、不連続点を認識することの根拠である。極限概念よりも一見直観的かもしれないが、不連続点の認識は超越的な思考であり、それを自然で直観的である、と思わせるものは何か、を説明できないといけない。これがこの手法の課題である。

最後に一言別の観点を記しておこう。一様位相による計算問題の扱いにおいて、不連続点の認識は計算機言語の型に相当する。型は計算そのものには組み込まれていない。計算の外で型を決めて、各型の中で計算を行う。計算機上ではデータはすべて有限情報しか持たないが、プログラム言語の型と一様位相とは構造的な類似点をもっている。

4.3 二種の列計算可能性について

極限再帰的列計算可能性と一様位相的列計算可能性とは、概念的には相互に異質なものである。しかしある自然な条件を満たす例では、それらは同値

になる ([14])。たとえばガウス関数のような「区分連続関数」、ファイン位相における「ファイン連続関数」などについては「実効的連続性」の仮定のもとで一様位相的列計算可能性と極限再帰的列計算可能性とは同値である ([11], [12])。数学的には2種類の列計算可能性が相互に翻訳される。しかしその際に概念的にどのような翻訳が行われているのか、を知るにはなお詳細な分析を必要とする。

極限再帰的列計算可能性は [7] でも述べているように、機械的な力づくの計算方法であり、数学的な直観に訴えるものではないともいえる。他方その単純さと、連続関数の列計算可能性の自然な拡張になっている、という意味で優れている。求める真の値を知るためには極限操作が必要であって、計算過程において現在どこにいるのか不明であることは不安かもしれないが、正しい軌道上にいることは保証されている、という安心感がある。

一様位相的列計算可能性では、4.2節でも述べたように不連続点の認識という超越的な行為が基礎になる。極限再帰的列計算可能性では不連続点を「認識」しない、あるいはその必要がない。再帰性を超える部分は再帰関数の極限同定であり、それは再帰関数の延長上にある。極限再帰関数は、いわゆる計算論としては自然なものである。しかし、人間は多くの場合に逆に不連続点こそ容易に認識する。ガウス関数の例では、人はまず整数点を認識し、その点での関数値を計算し、そこから右方向の関数値もそれによって決めることができる。極限再帰性にはこのような自然さはない。

以上のように、不連続関数の列計算可能性に関して、「計算論的な意味での自然な拡張」と「数学者の視点からの自然な拡張」の二手法を検討してきた。数学的にはどちらにも意味があり、状況によってどちらも使い勝手がある。いずれにしても現在までのこの二手法についての考察は、数学的相互関係が主であった。数学者の営みとしての計算可能性問題のためには、人間の認識力についての考察を深めなければならない。

5 問題点についての考察

不連続関数の「列計算」を人の認識行為とみなすとき、そこには二重構造がある。その二重構造を、階層としてではなく、ひとつのシステムとみただることを試みるのが一方法かもしれない。

プログラム言語において、前述のように型は計算部分とは別の機能をもつが、実際に作成するプログラムでは両者は共存して、計算プログラムという一つのシステムを構成している。一様位相化とそこでの計算、再帰関数による計算と極限同定、においても同様の考え方ができないだろうか。

たとえば、再帰関数による計算とその拡張である極限同定を一つの計算プロセスとして組み立ててしまうことは不可能ではないだろう。あるいは、一様位相の決定（不連続点の認識）とそこでの再帰的な計算を、プログラム

の場合のように、統合された一つの機構として見立てられないだろうか。

以上の考察において、人が先か、数学が先か、ということは問わないが、数学（この場合は二手法による関数の列計算可能性）の哲学的基礎の考察のためには「人間が数学をする」という視点が必要で、「数学における計算についての人間の認識とは何か」ということから出発しなければならない。

たとえば極限同定を「計算」と認知できるか、あるいはそれを直観的に「計算」と思うことができるか、と問うことができる。もしできるとすればその根拠は何か、についての答えは一つではないだろう。ある事象に対する直観というのは決まったものではないはずだ。たとえば | の繰り返し ||| を数とみなすのは、人間どうしのコミュニケーションの手段としてはよいかもしれないが、数に対する直観は | の繰り返しではない。しかし | の繰り返しに慣れ親しめば、それが数としての直観になるかもしれない。「直観的」はそれ自体独立した認識方法であろうが、その内容は決まったものではない。

以上不連続関数の列計算可能性についての問題点を指摘してきた。問題に対する答えは一通りではないであろうし、部分的に考察が進めば、問自体が変わるかもしれない。柔軟な思考で答えを探していきたい。

参考文献

- [1] E.M. Gold, *Limiting recursion*, JSL, 30-1(1965), 28-48.
- [2] M.Nakata, S.Hayashi, *A limiting first order realizability interpretation*, SCMJ Online 5(10)(2001), 421-434.
- [3] 小林聡, ” 極限計算可能数学のゲーム意味論 ”, 日本ソフトウェア科学会 第 2 4 回大会論文集 (2007), CD-ROM.
- [4] P.G. Odifreddi, *Classical recursion theory*, Elsevier, 1999.
- [5] M. Pour-El and I. Richards, *Computability in analysis and physics*, Springer, 1989.
- [6] Y.Tsujii, M.Yasugi,T.Mori, *Some properties of the effectively uniform topological space*, Computability and Complexity in Analysis, LNCS 2064, (2001),336-356.
- [7] 八杉満利子, ” 不連続関数の極限計算可能性-意義と問題点- ”, 科学基礎論研究, vol.30,no2(2003), 13-18.
- [8] Yasugi, M., Brattka, V., Washihara, M., *Computability aspects of some discontinuous functions*, SCMJ Online 5(10) (2001), 405-419
- [9] M. Yasugi and M. Washihara, *Computability structures in analysis*, Sugaku Expositions (AMS) 13(2000),no.2,215-235.

- [10] M. Yasugi, M. Washihara, *A note on Rademacher functions and computability*, Words, Languages and Combinatorics III, World Scientific, 2003, 466-475.
- [11] M.Yasugi, Y.Tsujii, *Computability of a function with jumps-Effective uniformity and limiting recursion-*, Topology and its Applications (Elsevier Science), 146-147(2005), 563-582.
- [12] M.Yasugi, Y.Tsujii, T.Mori, *Sequential Computability of a Function - Effective Fine Space and Limiting Recursion -*, JUCS 11-12(2005), 2179-2191.
- [13] M.Yasugi, T.Mori, Y.Tsujii, *The effective sequence of uniformities and its limit: as a methodology in computable analysis*, Annals of the Japan Association for Philosophy of Science, vol.15, no.2(2007),99-121(47-69).
- [14] M.Yasugi, *Effective uniformity versus limiting recursion in sequential computability of a function*, manuscript.

Prisoner's Dilemma Network: Experiments and Simulations

Kouhei Iyori

Faculty of Economic Sciences, Hiroshima Shudo University

1-1 Ozuka-Higashi 1-chome, Asaminami-ku, Hiroshima, JAPAN 731-3195

Abstract

This paper describes how people establish or fail to establish long-run cooperation in the Prisoner's Dilemma Network (PDN), where subjects are allowed to nominate a subject with whom they want to play the Prisoner's Dilemma (PD) game at the beginning of each round. We modeled PDN games played by four persons with two pairing rules and two information treatments, and we have done a series of experiments with undergraduates and computer simulations of the PDN games. In the experiments most subjects either continued to play the PD game cooperatively with the same partner or never played the PD game cooperatively in the long run, and those who were more cooperative earned more. In addition, the information of others' behaviour increases the rate of cooperation and average points in the experiments. To analyse the players' behaviour by using computer simulations, we introduced the concept of "trustability" to computer agents, and we tried to reproduce the basic features of experimental results. Since the simulations reproduced the results of the experiments, we can guess the subjects' strategies, which were not as apparent and controllable as the programs of agents.

Key Words:

Prisoners' Dilemma Network, Experimental Economics, Computer Simulations.

1 Introduction

Most analysis of the repeated prisoner's dilemma[2] presumes that no player is allowed to change the person with whom he or she plays the prisoner's dilemma (PD) game. In the real world, however, one can usually choose and change the partner for business and other activities if he or she thinks it is necessary or desirable. The prisoners' dilemma with outside option is one of the approach to introduce partner selection. In the PD game with outside option[1][5], players can choose their opponents from their group, however, they have to choose the same actions to all their partners.

Yamagishi, Jin, Hayashi, Shinozuka and Takahashi[3][4][6][8] proposed the prisoner's dilemma network (PDN), where players are allowed to choose their partners for the PD games. They have done a number of experiments with human subjects of the PDN, and computer simulations as well. Their findings, for example the effectiveness of "Out-for-Tat" strategy[7][8] (change the partner if defected), are interesting and suggestive, but their simulations and experiments are not comparable with one another; the number of players, the payoff matrix and other details are different from research to research. We have done a series of experiments and simulations for the same PDN games. By comparing the results of experiments and those of simulations, we could guess the strategies of human subjects, which are not as apparent as the programs of agents in simulations.

This paper is organised in the following way. In Section 2 our PDN games will be defined with a few basic properties. In Section 3 the results of experiments with undergraduates will be shown. Among findings noteworthy are: that having played the PDN game for a certain number of rounds, most subjects either continue to play the PD game cooperatively with the same partner or never play the PD game cooperatively, and that those who are more cooperative usually earn more in the long run. And the information of others' behaviour will increase the rate of cooperation and the average points. In Section 4 our model will be presented with the results of its computer simulations, which reproduce the findings. In Section 5 a few concluding remarks will be mentioned.

2 The Prisoners' Dilemma Network Model

2.1 Basic Model

The PDN game consists of two stages: at the first stage, players nominate a candidate of their opponent of the PD game and they are paired according to the pairing rules, and at the second stage, players who are paired play the PD game with his or her opponent.

In this paper we shall examine two pairing rules: PDN α and PDN β . The games are played by four persons in the following way.

1. Each player nominates a player.
2. Those who nominate each other make a pair.
- 3- α . PDN α : Those who are paired play the PD game whose payoff matrix is given in Table 1, while those who are not paired earn one point.
- 3- β . PDN β : If only one pair is made, the other two players are paired. If no pairs are made, the four players are randomly divided into two pairs. Then all the players play the PD game in two groups. The payoff matrix of the PD game is also given in Table 1.

We call the procedure from 1 to 3- α or 3- β a *round*, and the set of rounds under the same treatment a *session*.

Table 1: the payoff matrix

	cooperate	defect
cooperate	3, 3	0, 5
defect	5, 0	1, 1
1 if not paired		

2.2 Information Structure

In this paper, we introduce two information structures in the Prisoners' Dilemma Network experiments.

Limited information : Players only know the information about their opponents' past actions. A player cannot know the actions of other players who were not paired with her in the PD game.

Full information : Players know all players' past nomination, combination of pairs and actions in the PD game.

2.3 Analysis

Let us examine how long it will take for a four-person group to make two pairs in PDN α if they all cooperatively try to do so. Suppose that every subject randomly nominates one of the other three members of her group till she is nominated by the person she nominates, and that once two subjects nominate each other, they continue to do so for ever.¹ Designating the probability where n pairs ($n = 0, 1, 2$) are made at the t th round as $P_n(t)$, we obtain the following equations:

$$P_0(0) = \frac{30}{81}, P_1(0) = \frac{48}{81}, P_2(0) = \frac{3}{81}, \quad (1)$$

$$P_0(t+1) = \frac{30}{81}P_0(t), \quad (2)$$

$$P_1(t+1) = \frac{48}{81}P_0(t) + \frac{8}{9}P_1(t), \quad (3)$$

$$P_2(t+1) = \frac{3}{81}P_0(t) + \frac{1}{9}P_1(t) + P_2(t). \quad (4)$$

Figure 1 shows the graphs of $P_0(t)$, $P_1(t)$ and $P_2(t)$. We can see that after 50 rounds are played, two pairs will be realised with a high probability ($P_2(50) = 0.997$).

¹For convenience, we assume that the player is female while her opponent is male throughout the paper. It is not always the case in the experiments.

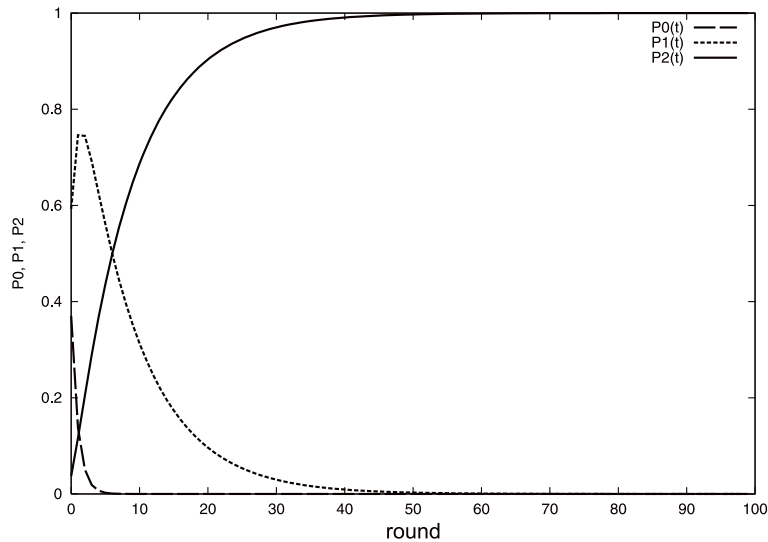


Figure 1: $P_0(t)$, $P_1(t)$ and $P_2(t)$

3 Experiments

3.1 Experimental Design

Our experiments were done with undergraduate students at the laboratory of the Graduate School of Economics, Kyoto Sangyo University (KSU). The KSUEEL, established in March 2002, is specially designed for economic experiments. It consists of the control room and the main room, where 25 subjects can sit down separately in 25 booths. A network connects the 25 client PCs in the booths with the two servers (Linux and Win2k) in the control room.



Figure 2: The KSU Experimental Economics Laboratory (KSU-KEEL)

Experiments are held in six days from July 2002 to July 2005, and 20-28 undergraduates participated in each day.

Subjects were all recruited from KSU undergraduates through advertisements placed on the WWW and direct e-mail. The advertisement on the web page promised monetary reward contingent performance in the experiments.

At the beginning of each session subjects were divided into anonymous four-person groups to play the PDN game. Subjects were told this but were not informed how many rounds they will play in each session. To avoid end-effect, the number of rounds was decided randomly between 101-130 in each session.

In the game subjects were allowed to communicate with others only through the computer in their booths. Figure 3 shows the picture of the beginning of a round.

On the screen the followings are shown: three buttons to nominate one of the other three group members (the upper-right part); the payoff matrix of the PD game (the lower-right part); the session number, the round number and the records of all the past rounds (the left part): the round number, the subject's past nomination and, if she played, her opponent mentioned by the colour of the nomination button, her action, her opponent's action, and her point. This screen is for the experiment of PDN α in limited information treatment. In the experiment of PDN β in limited information treatment, a column is added in the left part to indicate whether the opponent is determined by nomination (2) or compelled (3- β). In the full information treatment, all players' past nomination, opponents and actions are shown in the left part.

At the end of the experiment, subjects received reward in cash according to their total points: reward (yen) = 6 × (total points) + 1000.



Figure 3: The subject's screen

3.2 The Results of Experiments

3.2.1 Limited Information Treatment

The overall performance of each session in the limited information treatment is summarised in Table 2 and 3.² Among findings two are noteworthy.

Table 2: Experimental conditions and overall performance 1: limited information

date	24 Jul. 2002		27 Jul. 2002	
treatment	α -1	β -2	β -1	α -2
number of subjects	24	24	24	24
rounds	104 (100)	117 (100)	127 (100)	114 (100)
max points	254 (242)	348 (300)	383 (300)	342 (300)
min points	104 (100)	102 (85)	129 (91)	97 (83)
average points	149.6 (143.4)	237.8 (202.2)	261.7 (201.6)	251.4 (218.7)

Table 3: Experimental conditions and overall performance 2: limited information

date	12 Apr. 2003		23 Apr. 2003	
treatment	α -1	β -2	β -1	α -2
number of subjects	20	20	28	28
rounds	114 (100)	107 (100)	111 (100)	119 (100)
max points	340 (298)	321 (300)	327 (294)	327 (300)
min points	113 (99)	102 (95)	106 (96)	105 (96)
average points	206.75 (179.4)	255.1 (239.1)	240.8 (214.3)	250 (228.5)

First, for most four-person groups the number of *partnered pairs*, or those pairs who continue to nominate each other and keep cooperation in the PD game, is fixed after 80 rounds are played. Table 4 shows the classification of the groups. Here Case n stands for the case where the number of partnered pair is n . Every case is classified into Case 0 (Figure 4), Case 1 (Figure 5) or Case 2 (Figure 6) except for two (Figure 7 and 8).

²The figures in the parenthesis are recalculated on the assumption that the number of rounds is 100.

Table 4: The classification of experiments

-	Case 0	Case1	Case 2	others
PDN α -1	5	5	0	0
PDN α -2	0	7	5	1
PDN β -1	3	5	5	0
PDN β -2	2	4	3	1

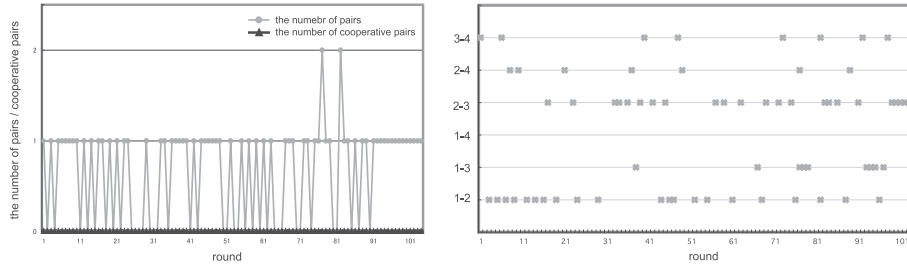


Figure 4: An example of Case 0

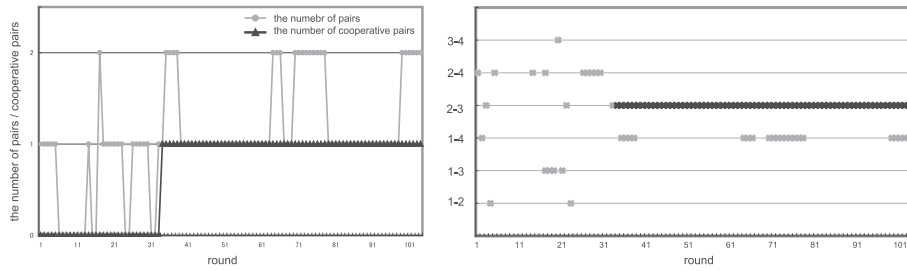


Figure 5: An example of Case 1

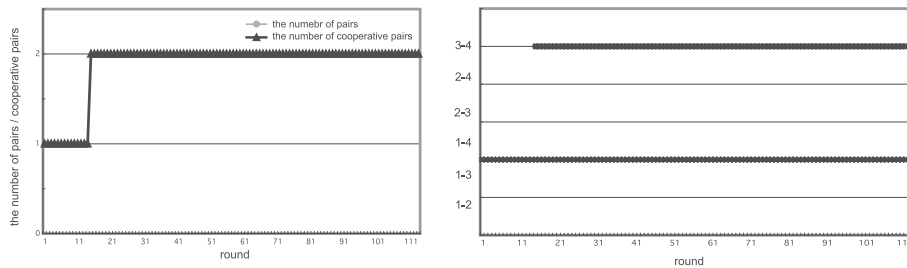


Figure 6: An example of Case 2

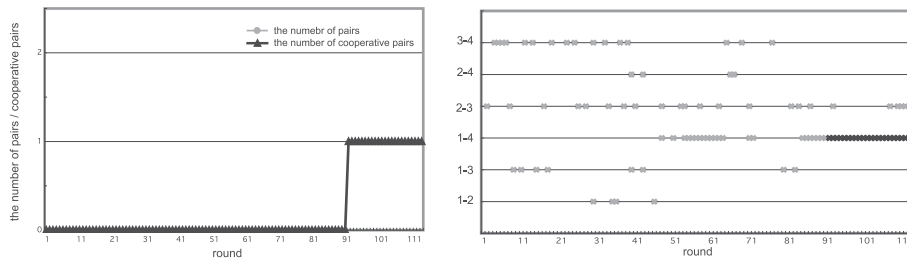


Figure 7: The exceptional case in $PDN\alpha-2$

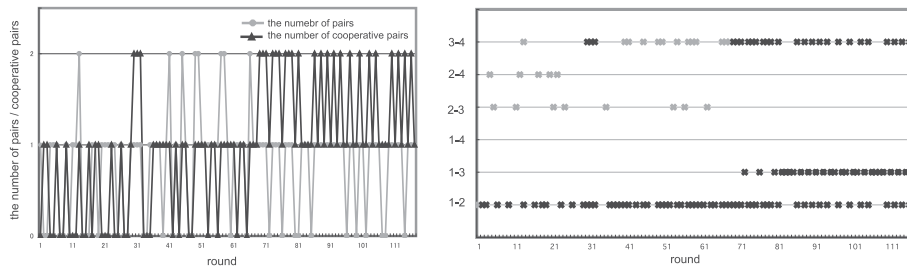


Figure 8: The exceptional case in $PDN\beta-2$

Secondly, subjects' points earned in a session are positively related to their propensity to cooperate, or the percentage of the number of rounds where they play the PD game cooperatively to the number of rounds where they played the PD game. See Figures 9 and 10, where the positive correlation is apparent for both $PDN\alpha$ (Figure 9) and $PDN\beta$ (Figure 10).

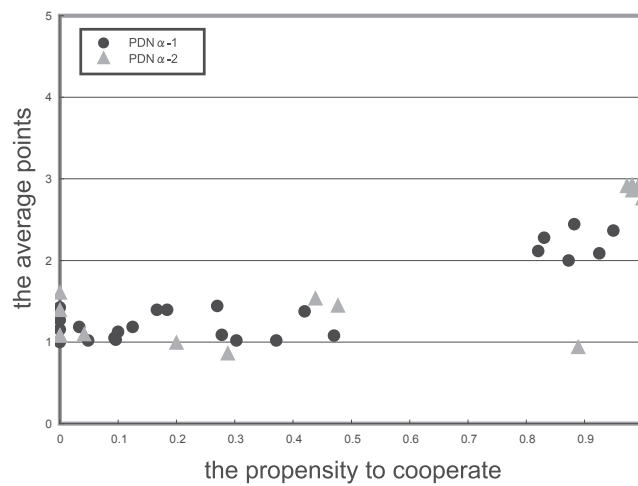


Figure 9: Average points in $PDN\alpha$

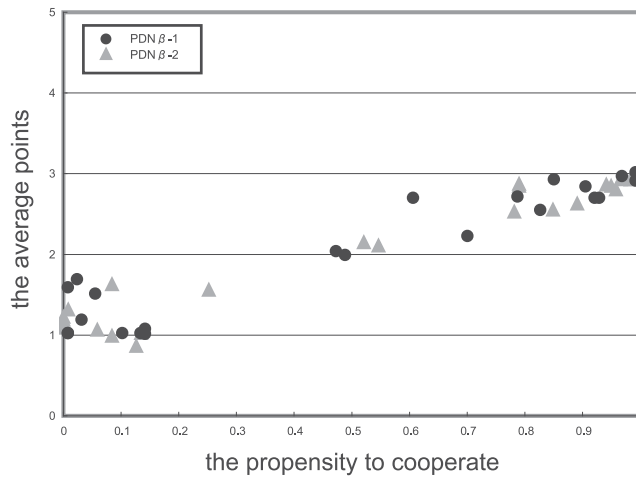


Figure 10: Average points in PDN β

3.2.2 Full Information Treatment

Table 5 and 6 show the results of the experiments in the full information treatment. In this treatment, the number of it partnered pairs is much increased than the results in the limited information treatment. Especially in PDN- β , all subjects reached Case 2, that is, all of them played PDN game with the same partner and chose cooperation continuously.

Table 5: Experimental conditions and overall performance: full information

date	20 Jul. 2005		23 Jul. 2005	
treatment	α -1	β -2	β -1	α -2
number of subjects	24	24	20	20
rounds	101 (100)	103 (100)	102 (100)	75 (100)
max points	303 (300)	309 (300)	309 (300)	225 (300)
min points	107 (105)	193 (184)	225 (219)	212 (283)
average points	212.5 (210.4)	288.4 (280)	274.1 (268.7)	210.4 (280.5)

The average points which subjects earned in the full information treatment are also increased than that in the limited information treatment. This shows that most of subjects established cooperative relationships with the same partner when they knew all of the others' behaviour.

When a subject knows the past nomination of other members in his or her group, the subject can nominate the one who desires to be paired with him or her. Therefore the probability of being paired will increase and in many cases they will behave well because their actions are opened to others.

In the full information treatment, some defective subjects changed their actions sud-

denly in the middle of the session. In the limited information treatment, defective subjects did not change their actions through the session. This may indicate that subjects observe others' behaviour and they sometimes imitate others' actions which seem to be working well.

Table 6: The classification of experiments: full information

–	Case 0	Case 1	Case 2	others
PDN α -1	0	1	3	2
PDN α -2	0	1	5	0
PDN β -1	0	0	6	0
PDN β -2	0	0	6	0

4 Computer Simulations

In this section, we describe our computer simulation model which reproduces the basic features of the experiments. At first, we introduce the concept of “trustability” of players which represents a player’s subjective expectations of the cooperative behaviour of his or her opponent. Therefore, the value of one’s trustability of the other player corresponds to the trustfulness of the other player. Secondly we describe how players decide their behaviour. Players decide their actions based on the value of trustability, and they adjust the value of trustability through the PD game. The value of trustability will increase when their opponents behave well and the value will decrease when their opponents betray them. In this paper, we only examine the cases of limited information treatments. We introduce our definition of trustability and players’ action rules in the next subsection.

4.1 Simulation Model

Let us introduce the following notation:

$$X_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if player } i \text{ plays the PD game with player } j \\ & \text{at } t\text{th round and chooses cooperation;} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

$$Y_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if player } i \text{ nominates player } j \text{ at } t\text{th round;} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

$$Z_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if player } i \text{ is paired with player } j \text{ at } t\text{th round;} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

$$W_{ij}(t) = \max\{Y_{ij}(t), Z_{ij}(t)\} \quad (8)$$

We define the trustability of player j by player i , or the trustfulness of player i to player j , at the beginning of the t th round as:

$$T_{i,j}(t) = W_{ij}(t) \left(\frac{1}{1+r_i} \right) \{r_i X_{ji}(t) W_{ji}(t) + T_{ij}(t-1)\} + \{1 - W_{ij}(t)\} T_{ij}(t-1) \quad (9)$$

where r_i is a positive constant.

As is readily checked,

$$0 \leq T_{ij} \leq 1. \quad (10)$$

A player's trustability increases if she is nice (does not change nomination or cooperative action unless the opponent does) while it decreases if she is nasty (changes nomination or cooperative action if the opponent does not). If she keeps to be nice (nasty), her trustability will approach to 1 (0):

$$T_{ij} > T_{ij}(t-1) \quad \text{if } W_{ij}(t) = W_{ji}(t) = X_{ji}(t) = 1 \quad (11)$$

$$T_{ij} = T_{ij}(t-1) \quad \text{if } W_{ij}(t) = 0 \quad (12)$$

$$T_{ij} < T_{ij}(t-1) \quad \text{if } W_{ij}(t) = 1 \text{ and } W_{ji}(t) X_{ji}(t) = 0 \quad (13)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T_{ij}(t) = 1 \quad \text{if } W_{ij}(t) = W_{ji}(t) = T_{ij}(0) = 1 \quad (14)$$

$$T_{ij}(t) = 1 \quad \text{if } W_{ij}(t) = W_{ji}(t) = T_{ij}(0) = 1 \quad (15)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T_{ij}(t) = 0 \quad \text{if } W_{ij}(t) = 1 \text{ and } W_{ji}(t) X_{ji}(t) = 0 \quad (16)$$

$$T_{ij}(t) = 0 \quad \text{if } W_{ij}(t) = 1 \text{ and } W_{ji}(t) X_{ji}(t) = T_{ij}(0) = 0 \quad (17)$$

Players nominate and choose action in the PD game according to her trustfulness to others. First, each player nominates the person who is the most trustable to her (if the number of the most trustable persons is greater than one, she chooses one of them randomly):

$$\text{Prob}(C_{ij}(t)=1) \begin{cases} = 0 & \text{if } T_{ij}(t) < \max_{k \in \{m\}} T_{ik}(t) \\ = \frac{1}{\#\{T_{ij}(t) | T_{ij}(t) = T_{ik}(t)\}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

where $\{m\} = \{1, 2, 3, 4\} - \{i\}$. Then she chooses the cooperative action in the PD game with the same probability as her opponent's trustability:

$$\text{Prob}(X_{ij}(t)=1) = T_{ij}(t-1). \quad (19)$$

Let us conclude this subsection with a few remarks on r_i . It represents player i 's discount rate. She does not change her action in the PD game throughout the session if $r_i = 0$, while she simply imitates the opponent's previous action if $r_i = \infty$. The basic strategies for the repeated PD game can be reproduced by choosing r and $T_{ij}(0)$ adequately; for example the Tit-for-Tat strategy is realised by $r_i = \infty$ and $T_{ij}(0) = 1$.

4.2 The Results of Simulations

We have done 500,000 sessions for $\text{PDN}\alpha$ and 500,000 sessions for $\text{PDN}\beta$. In each session $T_{ij}(0)$ and r_i are randomly chosen from $[0, 1]$ and from $[0, 100]$ respectively, and 100 rounds are played.

In simulations, two long-run properties observed in the experiments are reproduced. First, as Table 7 shows, about 90 percent of the 1,000,000 sessions are classified into Cases 0, 1 and 2. A few remarks may be called for here. In the table a pair is called partnered if they play the PD game cooperatively for the last 20 rounds or fail to do so only once, and n pairs are partnered in Case n . In simulations, case 1 is defined as the case where two agents are partnered, whatever the other two agents behaviour. As a consequence such a case as is shown in Figure 7 in the experiment is classified into Case 1. On the other hand the definition of partnered pairs is more strict in the simulations; out of the 17 partnered pairs in the experiment, three pairs failed to nominate each other or to play the PD game twice (no pairs failed more than twice). Yet the deviations from partnership seem to be an ending effect, which does not exist in the simulations. In fact, judging from the answers to the questionnaire after the experiment, not a few subjects suspected that the last round would be approaching after they played 90 rounds, in the second round in particular.

Secondly, as Figures 14 and 15 show, the positive correlation between the player's propensities to cooperate and their average points are also reproduced. In Figures 14 and 15, only 2,000 points of randomly chosen from 500 sessions are shown.

Table 7: The classification of simulations

	Case 0	Case 1	Case 2	others
$\text{PDN}\alpha$	63.6%	24.8%	0.8%	10.8%
$\text{PDN}\beta$	2.7%	61.9%	26.3%	9.1%

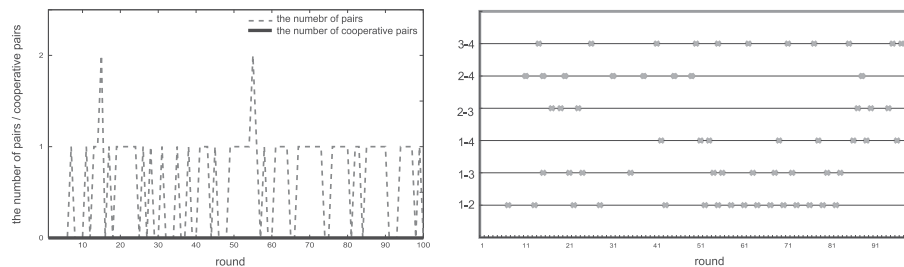


Figure 11: Case 0 in $\text{PDN}\alpha$

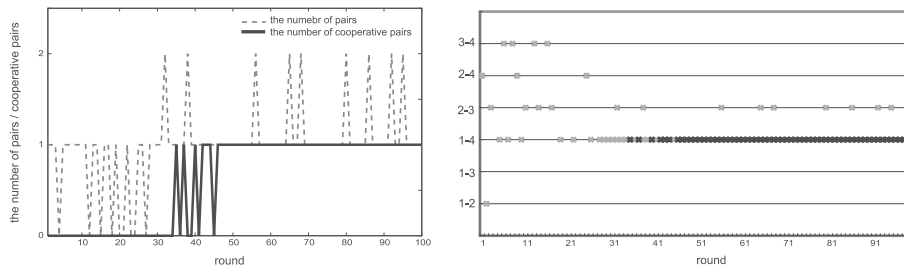


Figure 12: Case 1 in $PDN\alpha$

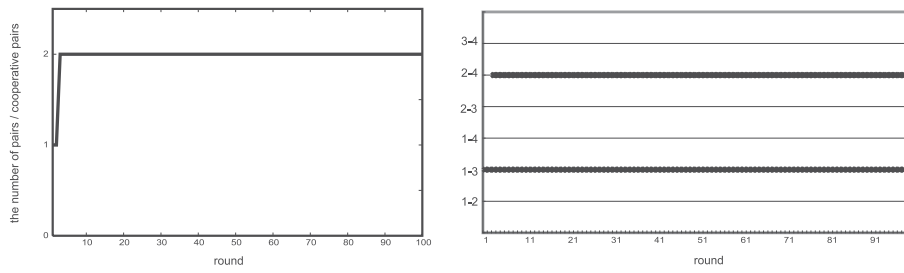


Figure 13: Case 2 in $PDN\alpha$

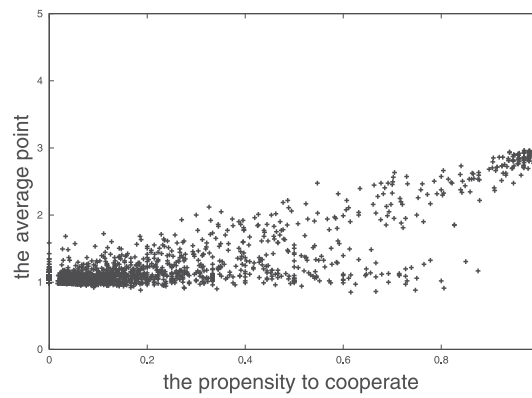


Figure 14: The average points in $PDN\alpha$

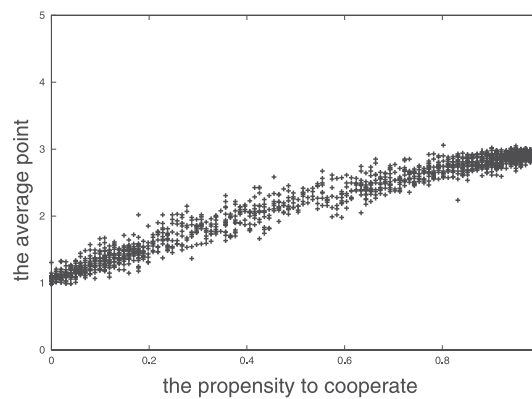


Figure 15: The average points in $PDN\beta$

5 Concluding Remarks

In this paper, we described how people behave and establish long-run relationships in the Prisoner's Dilemma Network, where players are allowed to nominate and change their opponents voluntarily. We made a four-person PDN model and we have done a series of experiments and simulations in the same PDN model.

We introduced two pairing rules and two information structures into the PDN model. From the results of experiments, we observed followings:

1. Having played the PDN games for 80 rounds, most subjects either continue to play the PD game cooperatively with the same partner or never play the PD game cooperatively.
2. Those subjects who are more cooperative usually earn more in the long run.
3. The rate of cooperation and the average points are much larger in the full information treatment where a player knows all other players' past behaviour.

In computer simulations, we proposed a concept of the trustability as the basis of a player's behaviour. We examined our simulation model in the limited information treatment and simulations reproduced the two properties mentioned above observed in the experiments.

Though we should be careful to conclude that our model simulates subjects' strategies in the PDN games, we could say at least that our model could be a candidate deserving further study.

Acknowledgements

The author would like to thank Prof. Sobei H. Oda, Kyoto Sangyo University for his helpful comments. This research was partially supported by the Open Research Centre "Experimental Economics: A new method of teaching economics and research on its impact on society", the Graduate School of Economics, Kyoto Sangyo University and Japan Society for the Promotion of Science, Grant-in-Aid for Scientific Research (B), 13480115.

References

- [1] Arno, R. and Ule, A., "Exclusion and Cooperation in Social Network Experiments", Working paper, CREED (2002).
- [2] Axelrod, R., *The Evolution of Cooperation*, New York: Basic Books (1984).
- [3] Hayashi, N., Jin, N. and Yamagishi, T., "Prisoners dilemma network: A computer-simulation of strategies", *Japanese Journal of Social Psychology*, Vol. 8, No. 1, pp.33-43 (1993).
- [4] Hayashi, N. and Yamagishi, T., "Selective play: Choosing partners in an uncertain world", *Personality and Social Psychology Review*, Vol. 2, pp.276-289 (1998).

- [5] Hauk, E., “Multiple Prisoner’s Dilemma with(out) an outside option: An experimental study”, Economics Working Papers 391, Department of Economics and Business, Universitat Pompeu Fabra (1999).
- [6] Jin, N., Hayashi, N. and Shinozuka, H., “An experimental study of Prisoner’s Dilemma Network: Formation of committed relations among PD partners”, The Japanese Journal of Experimental Social Psychology, Vol. 33, No. 1, pp.21-30 (1993).
- [7] Takahashi, N. and Yamagishi, T., “Altruistic behavior can be profitable if people are not too generous or too demanding”, Paper presented at the 6th International Conference on Social Dilemmas, Wassenaar, Netherlands, June 18-23 (1995).
- [8] Takahashi, N., Yamagishi, T. and Hayashi, N., “Spontaneous formation of generalized exchange system: An experimental study of discriminating altruism”, The Japanese Journal of Psychology, Vol. 70, No. 1, pp.9-16 (1999).
- [9] Yamagishi, T., Hayashi, N. and Jin, N., “Prisoner’s dilemma network: Selection strategy versus action strategy”, Social Dilemmas and Cooperation, Berlin: Springer-Verlag, pp.233-250 (1994).

How to Use Private Information in a Multi-person Zero-sum Game ^{*}

Hiroyasu Yoneda¹, Gen Masumoto², and Sobei H. Oda³

¹ Kyoto Sangyo University

² Kyoto Sangyo University

³ Kyoto Sangyo University

1 Introduction

This paper describes how people play a zero sum game with different private information. Apparently more informed players earn more than less informed players do. What happens however if people buy and sell speculatively in the future market? Those who are better informed seem to have greater chance to earn money, while those who have no information may expect zero profit because they seem to have equal chance to make money (to buy a commodity whose price will increase or to sell a commodity whose price will decrease) and to lose money (to sell a commodity whose price will increase or to buy a commodity whose price will decrease) . Yet the sum of all traders is zero. If the most informed player earns profit and the least informed player expects zero profit, some modestly informed players must suffer loss.

Huber and Kirchler [1] formulated a simple model of the future market and observed the paradoxical distribution of gain and loss among players in their simulations with computer agents and experiments with human subjects. In this paper we shall develop their analysis to examine the strategies of players (agents and subjects) and income distribution among them in more detail.

This paper is organised in the following way. In the next section we shall define our model. In Section 3 we shall show some results of our simulations: income distribution changes drastically if some or all agents change their strategies. In Section 4 we shall present some findings of our experiments: human subjects change their strategies so flexibly to increase their profit according to the strategies of their competitors.

^{*} This paper is a shorter version of Yoneda, Masumoto and Oda [2] with some new findings in simulations and experiments but without details in mathematical analysis. The present study is based on the research by the Open Research Centre Project “Experimental Economics: A new method of teaching economics and the research on its impact on society” and Grants-in-aids for Scientific Research 17310029.

2 The Game

The game is played in the following order by $2M + 1$ players.¹

1. At the beginning of each round Player i ($0 \leq i \leq 2M$) tells his reservation price R_i to the auctioneer to make the contract that he will buy a unit of a future commodity if R_i is higher than its price P and that he will sell a unit of the commodity if $R_i < P$.
2. The auctioneer gathers all the reservation prices and declares the median of them as P so that demand equals supply in the future market.
3. The true value of the commodity V is determined exogenously as the sum of $2M$ stochastic variables: $V = \sum_{k=1}^{2M} X_k$ where X_1, X_2, \dots , and X_{2M} are determined identically and independently to be 0 or 1 with equal probability 0.5.
4. Those who bought (sold) the commodity in the future market sells (buys) it in the spot market at the true value V to close their accounts. Hence each player's profit is determined as soon as V is revealed.

Every player's profit is determined as a result of the above-mentioned trade: if $P < R_i$, Player i buys the commodity at P in the future market and sells it at V in the spot market to earn $V - P$ of profit; if $R_i < P$, Player i sells the commodity at P in the future market and buys it at V in the spot market to earn $P - V$ of profit. Needless to say, the sum of all player's profit is always zero: $\sum_{i:V < R_i} (P - V) + \sum_{i:R_i < V} (V - P) = 0$.

3 Simulations With Computer Agents

Let us assume that all players know how V is determined: $V = \sum_{k=1}^{2M} X_k$ and that before determining R_i , Player i can correctly see what values X_1, X_2, \dots , and X_i will be (Player $2M$ can predict the values of all the $2M$ variables while Player 0 can forecast nothing). In the circumstances Player i can take it into account to determine R_i that V will be between $V_i^{\min} = \sum_{k=1}^i x_k$ and $V_i^{\max} = \sum_{k=1}^i x_k + (2M - i)$. As is readily checked, a strategy that may choose a value smaller than V_i^{\min} or greater than V_i^{\max} as R_i is weakly dominated by such a strategy that chooses $R_i = V_i^{\min}$ or $R_i = V_i^{\max}$ then.

On the above-mentioned assumption and consideration, we run a number of simulations with 101 agents (namely $M = 50$) which follow either **the middle-value strategy**: $R_i = \frac{1}{2}(V_i^{\min} + V_i^{\max})$, or **the either-end strategy**: $R_i = V_i^{\min}$ or $R_i = V_i^{\max}$ with equal probability.

How gain and loss are distributed among the agents are illustrated in Figures 1-4. There the horizontal axis stands for the agent (from 0 to 100) while the vertical axis represents each player's average profit (for 10000 rounds).

¹ The game is as the same as the one presented by Huber and Kirchler (2004) except that the number of players is not even but odd.

The marginal contribution of private information to profit, which is defined as Player $i + 1$'s profit minus Player i 's, is not monotonously increasing (Figures 1 and 2). An agent may decrease his loss (and increase his gain) by adopting the strategy which is different from the strategy all the other agents follow (Figures 3 and 4).²

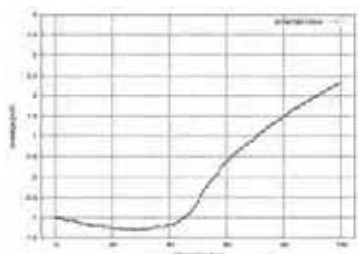


Fig. 1. Income distribution among middle-value strategy agents

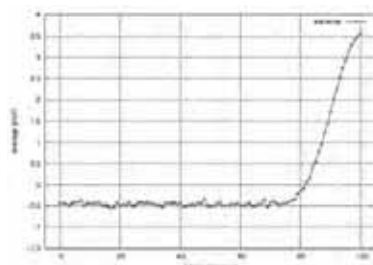


Fig. 2. Income distribution among either-end strategy agents

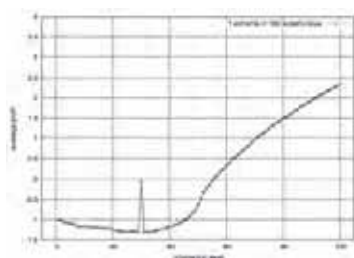


Fig. 3. Income distribution among an either-end strategy agent (Player 30) and middle-value strategy agents

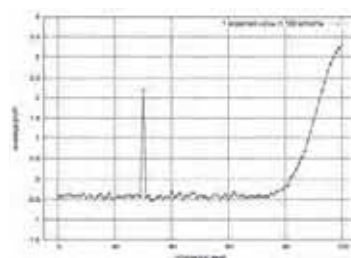


Fig. 4. Income distribution among a middle-value strategy agent (Player 30) and either-end strategy agents

Figure 5 shows how Player 30's profit changes if he follows the following strategy.

$$R_i \begin{cases} = V_i - \theta_i(V_i - V_i^{\min}) & \text{with probability } 0.5 \\ = V_i + \theta_i(V_i^{\max} - V_i) & \text{with probability } 0.5 \end{cases}$$

where $i = 30$, $0 \leq \theta_i \leq 1$ and $V_i = \frac{1}{2}(V_i^{\min} + V_i^{\max}) = \sum_{k=1}^i x_k + \frac{1}{2}(2M - i)$ (the strategy is the middle-value strategy if $\theta_i = 0$, while it is the either-end

² Except for small differences in the number of agents and their strategies, Figures 1 and 3 were discovered by Huber and Kirchler (2004).

strategy if $\theta_i = 1$). Player 30's profit increases as θ_{30} increases if all the other players follow the middle-value strategy (the solid curve), while it decreases as θ_{30} increases if all the other players follow the either-end strategy (the broken curve).³

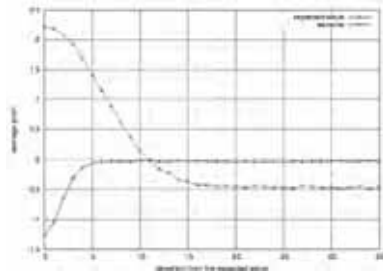


Fig. 5. The effect of $|R_{30} - V_{30}|$ ($=35\theta_{30}$) on Player 30's income

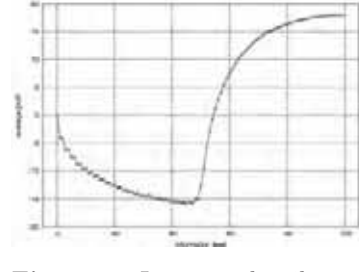


Fig. 6. Income distribution among deterministic either-end strategy agents

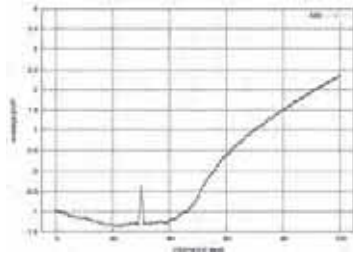


Fig. 7. Income distribution among a human subject (Player 30) and middle-value strategy agents

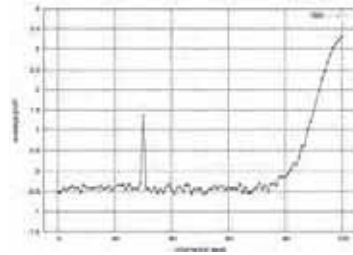


Fig. 8. Income distribution among a human subject (Player 30) and either-end strategy agents

³ Though omitting mathematical analysis, we should only mention the following to illustrate how the same strategy produces different profit if others change their strategies. It is not a coincidence that Player 30's profit is zero in Figure 3 and he can earn positive profit if he chooses V_i^{\min} or V_i^{\max} not randomly but systematically: $R_i = V_i^{\min}$ if $V_i < \frac{1}{2}i$; $R_i = V_i^{\max}$ otherwise. Yet income distribution in Figure 6, which is realised if all players adopt the above-mentioned strategy, is more uneven than it is in Figures 1 and 2.

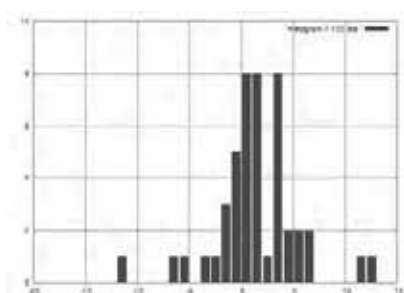


Fig. 9. Increase in $|R_{30} - V_{30}|$ from Session (b) to Session (c)

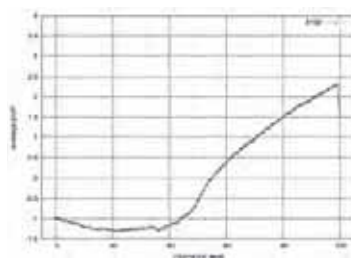


Fig. 10. Income distribution among a human subject (Player 100) and middle-value strategy agents

4 Experiments With Agents and Human Subjects

We did experiments with computer agents and human subjects at Kyoto Experimental Economics Laboratory (KEEL), Kyoto Sangyo University (KSU) on October 13 and 16, 2004. In total 46 undergraduates of KSU played the game mentioned in the previous section as a unique human player with 100 computer agents. To put it concretely, each subject played the game (a) with 100 middle-value strategy agents for 100 rounds as Player 100; (b) with 100 middle-value strategy agents for 100 rounds as Player 30; (c) with 100 either-end strategy for 100 rounds as Player 30. Twenty one subjects played the three sessions in the above-mentioned order, while the other subjects played the last two sessions reversely.

Figures 7 and 8 show how gain and loss were distributed among human subjects and computer agents in Sessions (b) and (c) respectively. There the horizontal and vertical axes are the same as in the previous figures; the data in Figure 7 is aggregated from Session (b) played as the second session and Session (b) as the third session, because the performance of players (subjects and agents) are not different between the two sessions; a similar remark applies to the data in Figure 8.

Although it is not as large as it is in Figures 3 and 4, an decrease in loss or increase in gain of Player 30 is visible in Figures 7 and 8, which fact suggests that our subjects changed their strategies according to the strategy of their competitors. It is confirmed by Figure 9, where about seventy per cent of our subjects chose R_{30} in more distance from V_{30} in (b) than they did in (c) (Wilcoxon signed rank test, $z=2.873$, $P=0.004$, two-tailed). Remembering Figure 5, we can see it increased their profits.

5 Concluding Remarks

The results of our experiments may suggest that human players can think and/or learn so flexibly that they can change their strategies according to

changes in their circumstances. With partial information and ignorance of their competitors' strategy, most human subjects outwitted their competitors (computer agents). This performance is even more impressive if we take it into account that not a few subjects failed to find out the best strategy ($R_{100} = V_{100}$) when they have the full information (Figure 10).

However, the good performance of our subjects may be benefited largely from the fact that their rivals are all such simple computer agents that cannot change their strategies. If they also could change their strategies according to their experience, the dynamics of the game would be so complicated that they could not be outwitted by human subjects.

References

1. Jürgen Huber and Michael Kirchler (2004): "The Value of Information in Markets with Heterogeneously Informed Traders - and Experimental and a Simulation Approach", presented at the 9th Workshop on Economics and Heterogeneous Interacting Agents, Kyoto University, Kyoto, Japan, 27-29 May 2004.
2. Yoneda, H., Masumoto, G. and Oda, S. H. (2004): "Marginal Contribution of Information to Profit in a Zero-sum Game", presented at Experiments in Economic Sciences: New Approaches to Solving Real-world Problems, Okayama International Hotel and Kyoto Sangyo University, Okayama and Kyoto, Japan, 14-17 December 2004; in *The proceedings of the Experiments in Economic Sciences: New Approaches to Solving Real-world Problems* <<http://www.kyoto-su.ac.jp/project/orc/execo/EES2004/proceedings.html>>, pp.770-786.

An Experimental Analysis of Environmentally Conscious Decision-making for Sustainable Consumption

Nariaki Nishino¹, Yasuyuki Okawa¹, Sobei H. Oda², Kanji Ueda¹

¹ Research into Artifacts, Center for Engineering (RACE), The University of Tokyo, Tokyo, Japan

² Faculty of Economics, Kyoto Sangyo University, Kyoto, Japan

Abstract

This study examines problems of environmentally conscious decision-making in resource consumption using experiments with human subjects. Environmentally conscious behavior is an important issue related to environmental problems such as natural resource exhaustion. However, environmentally conscious behavior must confront the dilemma posed by self-interest and public interest. This study constructs a decision-making model of this situation based on a game-theoretical approach. Experiments with human subjects reveal that a sense of crisis of resource exhaustion can influence decision-making. Vast resources are often consumed and resources decrease furiously when adequate resources remain. Environmentally conscious behavior emerges as resources approach exhaustion.

Keywords:

Environmentally conscious decision-making; Sustainable consumption; Game theory; Experimental economics

1 INTRODUCTION

This study examines problems of environmentally conscious decision-making in resource consumption.

Environmentally conscious behavior is a necessity to realize sustainable consumption. However, environmentally conscious behavior has characteristics of the dilemma posed by self-interest and public interest: environmentally conscious behavior is necessary to realize sustainable consumption, but it is frequently unprofitable; self-interested behavior that ignores environmental issues usually brings high profit or other benefits. Accordingly, free-rider problems arise, rendering the realization of sustainable consumption difficult. For example, although each oil producer might wish to exploit oil as much as possible to increase its own profits, overexploitation might exhaust oil resources. The extracting companies can make no profits if all the resources are exhausted. In other words, the producers must cooperate to achieve sustainable use of oil resources.

Manufacturers confront a similar dilemma in production activities. Manufacturers generally incur large costs to produce eco-friendly products. However, they can produce ordinary products at lower cost than eco-friendly products. If no one manufactures eco-friendly products, the environmental burden would be increased.

Moreover, this dilemmatic situation is applicable to our consumption in daily life. We can choose an environmentally friendly product or other products when we make a purchase. At present, we often think that a recycled product is inferior to brand new products with respect to product quality or design. However, such products are not good for environmental resource conservation, and consumers might ultimately be affected by a damaged environment. Similarly to these environmental problems, innumerable social dilemmas confront humans in the real world.

This paper models this situation simply based on a game theoretical approach. In our model, decision-makers such as manufacturers make decisions based on the amount of consumption of natural resources. Their profits will increase and the environment will worsen if natural resources are overly consumed. In contrast, if natural resources are less consumed, the environment can be conserved but their profits decrease.

This study conducts economic experiments with human subjects to analyze the associated decision-making. Economic experimentation is a new tool for social science study [1]. Economic studies that adopt this method are established as experimental economics. Just as engineers and scientists do in other fields, an economist can design an economic experiment or game to examine a particular theory or policy. The experimenter recruits participants for the experiments, promises that they will receive a monetary reward according to their performance in the experiments, and observes their actions in the experiment to verify whether those actions reflect the theory or policy as it was hypothesized.

The purpose of our study is to determine how environmentally conscious behavior arises under circumstances in which a dilemma exists between self-interest and the public interest.

This paper is organized as follows. Section 2 presents related literature. Section 3 explains our model and theoretical predictions. In section 4, we describe experiments with human subjects and present the results. Section 5 discusses how the environmentally conscious behavior emerges using experimental results. Finally, section 5 concludes our analyses with a few remarks.

2 RELATED LITERATURE

In this section, we explain the literature related to our study. The field of sustainable consumption is closely related to the present study in terms of its objectives. However, we approach those objectives using game theory and experimental economics.

Sustainable consumption

Numerous studies of sustainable consumption have been made [2]. For example, households' sustainable consumption patterns are analyzed using the waste input-output model [3]. Lenzen [4] and Wier et al. [5] studied household energy consumption and CO₂ emissions. Most of those studies of household environmental impact specifically examine energy consumption. Duchin [6,7] proposed the use of a social account matrix to construct scenarios about consumption. Hubacek and Sun [8] developed I-O based scenarios for land use and water consumption. The concept of a rebound effect is important for sustainable consumption. Greening et al. [9] present a survey of studies that were undertaken in the U.S.; the survey results indicate that the rebound effect is between about 0% and 50%. None of those studies treats problems of sustainable consumption as decision-making problems. Our study specifically addresses decision-making related to consumption, which confronts the dilemma between self-interest and public interest.

Game theory

Environmental problems are exacerbated by the dilemma posed by self-interest and group-interest. A famous explanation by Hardin [10] characterized these problems as "the tragedy of commons". These problems, which are called "social dilemmas", have spurred numerous theoretical studies, such as those that describe provision and use of public goods [11–14] and common-pool resources [15,16]. However, such studies mostly subsume that decision-making is accomplished independently in each period. For example, in a typical public good game, a player selects an amount of investment and obtains a payoff in each period. However, in this study, we model a game in which the value of resources is sustained over many periods. That is, players obtain a payoff from environmental resources and they can observe the decreasing resources because environmental resources are not reset at initial values in each period. In this situation, we examine whether players cease self-interested behavior before exhausting the environmental resources.

Experimental economics

In general, many studies have addressed public goods and common-pool resource games in the field of experimental economics. In those studies, similar games exist with sustained resources over a period, such as those investigated by Herr et al. [17], Walker et al. [18], and Bru et al. [19]. From the foundation of these games, we extend them to represent environmental problems: natural resources continue to be consumed and depleted endlessly. The present study particularly examines the transition of environmental resources. We examine whether subjects' behaviors can be altered by the effects of that resource transition or not.

3 MODEL

3.1 Decision-making model based on game theory

Based on game theory, we model a general decision-making system. The players are decision-makers with respect to consumption of natural resources. Using this game, we analyze how environmentally conscious behavior can emerge.

Let us consider an n -person game. Each player chooses action EC or EH. Action EC represents environmentally conscious behavior and action EH represents environmentally hostile behavior. Let R_t be the amount of natural resources in period t , which all players own jointly.

In each period, a player must decide to take action EC or action EH. If a player chooses action EC in period t , the player consumes a small share of natural resources, which we call share S . The amount of use is so small that the natural resources can recover all the consumption within the period. Namely, no destruction of natural resources occurs: R_t is renewed and the stock does not decrease. On the other hand, if a player chooses action EH in period t , the player consumes a large share of natural resources, which we call share L . In this case, the natural resources can recover only a part of that consumption. We define r as the amount of recovery, where $r < L$. Accordingly, the destruction of natural resources occurs and R_t decreases. In period t , the aggregate reduction of natural resources is represented as $n_{EH}(L-r)$, where n_{EH} denotes the number of players who choose EH in period t . It is noteworthy that R_t is not reset in each period and is carried over from the previous period: $R_{t+1} = R_t - n_{EH}(L-r)$. Figure 1 depicts this decision-making model by using a game-theoretical framework.

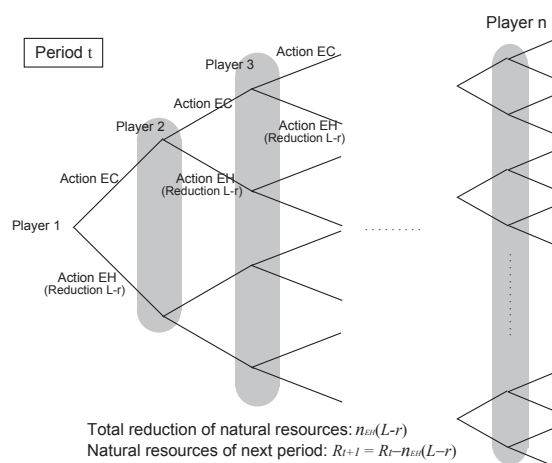


Figure 1: Model explanation by extensive form of game theory

Two types of payoff are defined: a consumption payoff and a natural resources payoff. The consumption payoff in period t for any player is $u_1(a_t) = a_t$, where $a_t \in \{S, L\}$. The natural resources payoff for any player is $u_2(R_t) = R_t/n$, where T is the final period of this game and players do not know T . The satisfaction derived from consumption of natural resources in each period is u_1 ; u_2 denotes the benefit from the ultimately remaining natural resources. A player can know the value of R_t in period t , but cannot know the final exact

amount of the natural resources payoff until the game is finished. The overall payoff that a player can obtain is the sum of u_1 and u_2 . Figure 2 shows an illustration of this game.

In this game, we prepare two types of game endings. The game can finish at period T . Alternatively, the game is finished when natural resources are exhausted ($R_t = 0$). Because R_t might be negative in the former game, a player might receive a negative payoff from natural resources. Therefore, it can be regarded as a game that represents problems of degradation of natural resources such as atmospheric pollution and greenhouse gases. On the other hand, the latter game can be regarded as involving environmental problems that represent limited natural resources such as petroleum, natural gas, bauxite, and so on. We respectively call these two games the degraded resources game and the limited resources game. Next, we consider theoretical predictions related to the games.

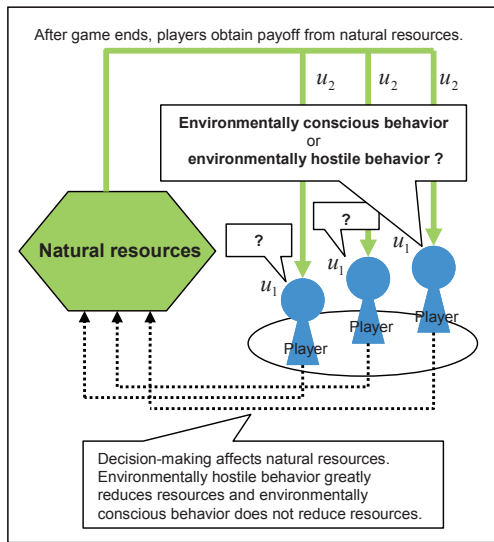


Figure 2: Illustration of the model

3.2 Theoretical prediction

Degraded resources game

In this game, we can consider two types of theoretical equilibrium. First, an equilibrium exists in which all players always choose EH, which we regard as an infinitely repeated game because players do not know the final period of the game. If a player has a discount factor δ ($0 < \delta < 1$), the natural resources payoff u_2 becomes zero as t approaches infinity: $\lim_{t \rightarrow \infty} \delta^t u_2 = 0$. Therefore, a player ignores u_2 and always chooses EH. Second, we can consider another equilibrium when we presume that the natural resources payoff u_2 is calculated, then divided into each period. In this case, the equilibrium depends on the value of natural resources reduction in each period $L - r$; the size of R_T , which might retain its value after T repetitions, does not matter. This game is equivalent to the n -person prisoner's dilemma if the following inequality holds [20]:

$$\frac{L-r}{n} < L-S < L-r \quad (1)$$

The total payoff with all EC is greater than that with all EH if this constraint holds.

Limited resources game

In this game, a Nash equilibrium is the strategy by which a player continues without R_t decreasing below zero. This continuing strategy is the best response for each player if the other players select this strategy. In other words, this strategy is that a player can select action EH as long as R_t is positive; otherwise, a player always selects action EC. If a player selects action EH, which makes R_t negative, then the game is finished and a player cannot obtain any payoff from this game. For this reason, the continuing strategy is a Nash equilibrium. Innumerable combinations of this strategy exist.

4 EXPERIMENTS WITH HUMAN SUBJECTS

4.1 Experimental design

In our experiments, we conducted four treatments. Treatments 1, 2 and 3, the degraded resources games, are conducted with different initial resources $R_0 = 0, 1000$ and 5000 , respectively. In treatment 4, the limited resources game is conducted. The setting of each treatment is shown in Table 1.

Table 2 shows other parameters used for the experiments. These parameters are determined to be satisfied with inequality (1) and are common to all games. Table 3 presents the game in another way: the consumption payoff and resource reduction by action of a player. As we define $n=3$, three players make decisions in a group. Accordingly, the total amount of natural resource reduction is 90 if three players participate in the game and if all players choose action EH.

Table 1: Four treatments

	Game type	Initial resources
Treatment 1	Degraded resources game	$R_0 = 1000$
Treatment 2	Degraded resources game	$R_0 = 0$
Treatment 3	Degraded resources game	$R_0 = 5000$
Treatment 4	Limited resources game	$R_0 = 1000$

Table 2: Parameters for experiments

Number of subjects in a group	$n = 3$
Small share of natural resources	$S = 30$
Large share of natural resources	$L = 46$
Amount of recovery in action EH	$r = 16$

Table 3: Consumption payoff and natural resources reduction change by action of a player

	Consumption payoff in each period	Amount of natural resource reduction
Action EC	30	0
Action EH	46	30

4.2 Human subjects

Subjects were recruited from among undergraduate students and graduate students at the University of Tokyo and Kyoto Sangyo University. The number of subjects in each game is shown in Table 1. Then, based on methodology of experimental economics, subjects are rewarded according to the total payoff, calculated as one yen per point in games.

Table 1: Number of subjects in each treatment

	Number of subjects
Treatment 1	45
Treatment 2	45
Treatment 3	24
Treatment 4	42

4.3 Results of the degraded resources game

In this game, decisions are repeated until period T . Subjects do not know when the game finishes. To conceal period T from subjects, we use a number between 50 and 70, which is determined randomly. After T repetitions, each player obtains a natural resource payoff R_T/n , where R_T denotes the remaining natural resources after finishing the game. Each player obtains a negative payoff from natural resources if R_T is negative. In these parameters, the total payoff (consumption payoff plus natural resources payoff) cannot be negative because all players always choose EH and get 16 in every period if we consider converting the natural resources payoff into each period.

Figure 3 shows the transition of average natural resources R_t . The figure shows that natural resources were constantly diminished in all treatments: some subjects continued to choose action EH and neglected the payoff from natural resources. These treatments imply that the change of initial natural resources R_0 does not affect a decreasing tendency.

Figure 4 shows the transition of the average ratio of action EC. That figure shows that 60–80% of subjects select action EC. In treatment 1, the ratio of EC is low until the 10th period; the ratio increases after the 25th period. On the other hand, fluctuations are few through the periods in treatment 3, indicating that those subjects did not change their behavior to a great degree.

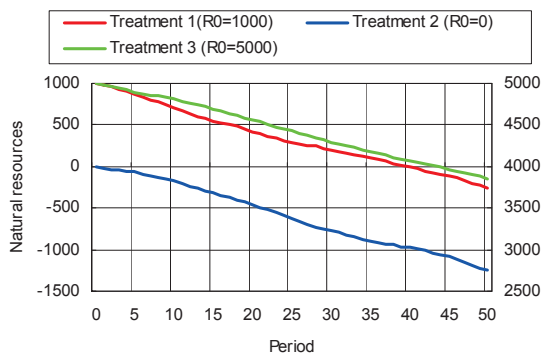


Figure 3: Transition of natural resources

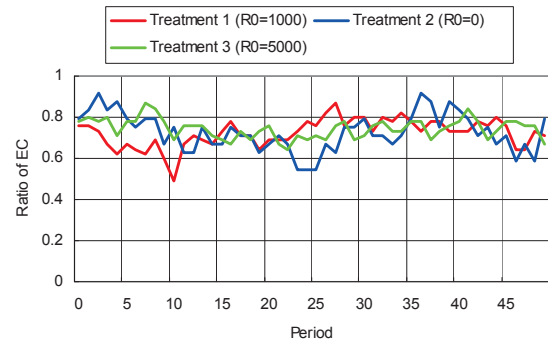


Figure 4: Ratio of environmentally conscious behavior EC

4.4 Results of the limited resources game

In this game, decisions are repeated until $R_t = 0$. However, we must define the maximum period T_{max} to avoid the case in which all players choose EC and the game continues indefinitely. The maximum period is determined as around 50–70. Players do not know the maximum number of periods. A message that the game is over is shown suddenly on the display in front of subjects when the period reaches T_{max} .

Figure 5 shows the transition of average natural resources R_t . Comparison with Fig. 3 shows that although natural resources decrease until the 30th period, the decrease of natural resources can stop after that. Therefore, subjects prefer to continue the game by preserving natural resources, rather than seeking the myopic consumption payoff. As a result, most subjects choose action EC. In most subject groups, depletion of natural resources does not occur and the resources can be preserved indefinitely. In treatment 4, only two groups out of all 14 groups finished before reaching T_{max} .

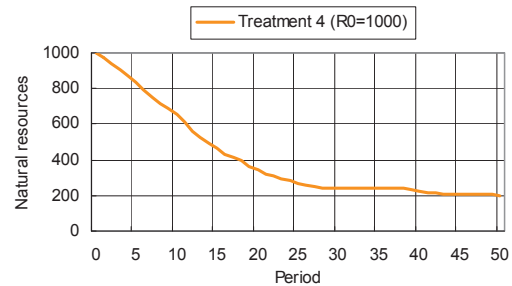


Figure 5: Transition of natural resources

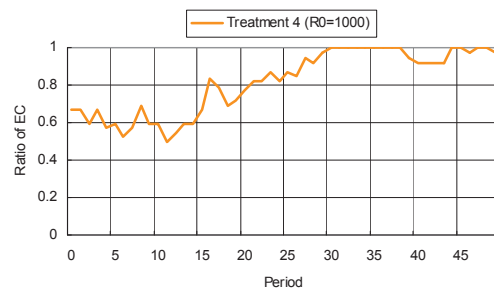


Figure 6: Ratio of environmentally conscious behavior EC

Figure 6 shows the transition of the average ratio of action EC. Compared with Fig. 4, although the ratio of EC is low in the early period, the ratio increases drastically in the latter half. Environmentally conscious behavior is fostered by a sense of crisis of resource exhaustion.

4.5 Comparison of the degraded resources game and limited resources game

A comparison of all four treatments is instructive. Figure 7 shows the transition of natural resources in all treatments. For easy comparison, we arrange the initial natural resources to be equivalent and plot the amount of reduction in Fig. 7. That figure shows that reduction in the first 20 periods is similar for treatments 1 and 4. On the other hand, treatments 2 and 3 show a similar appearance of reduction through all periods.

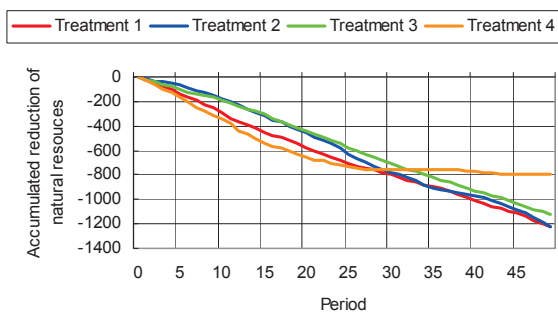


Figure 7: Transition of natural resources in all treatments

Next, we examine the relation between the change of behavior and the amount of remaining natural resources. Figures 8–11 show the frequency of behavior change in several amounts of resources. The vertical axis stands for the frequency of behavior change and the horizontal axis stands for remaining natural resources. In these figures, treatments 1 and 4 present a common remarkable feature. The line graph of "EH to EC" shows a peak around 10 in Figures 8 and 11. This means that before natural resources become zero, many subjects change their behavior from environmentally conscious behavior (EC) to environmentally hostile behavior (EH). Interestingly, many subjects change EC to EH, even though the game does not finish in treatment 1 when the natural resources become zero.

Treatments 2 and 3 mutually show a similar tendency. From Figures 9 and 10, it is found that subjects who change their behavior are few. Accordingly, in those treatments, there is no trigger to induce subjects to change behavior from environmentally hostile behavior to environmentally conscious behavior.

From these results, we can infer that a sense of crisis of exhaustion is important. However, it does not matter whether the exhaustion is true or not. A sense of crisis can trigger environmentally conscious behavior.

5 DISCUSSION

These experimental results indicate that environmentally hostile behavior cannot be halted in the degraded resources game (treatments 1, 2 and 3) even if the natural resources are decreasing, but the environmentally hostile behavior can

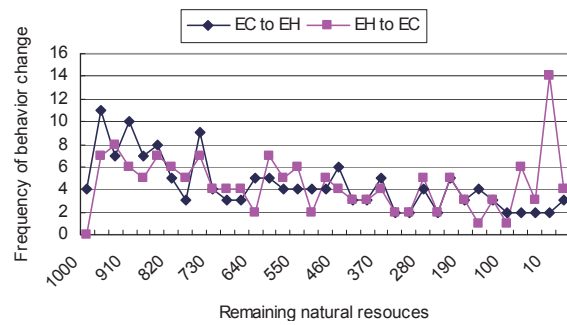


Figure 8: Relation between behavior change and remaining natural resources in treatment 1

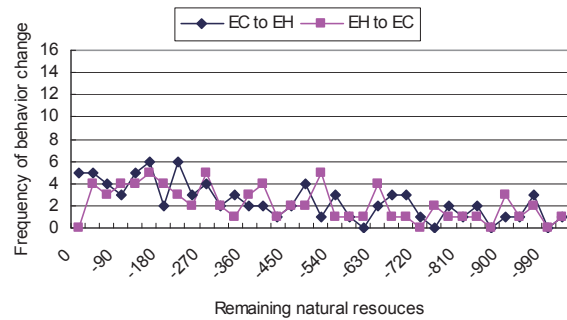


Figure 9: Relation between behavior change and remaining natural resources in treatment 2

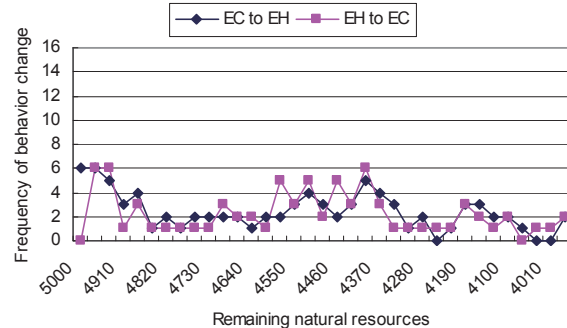


Figure 10: Relation between behavior change and remaining natural resources in treatment 3

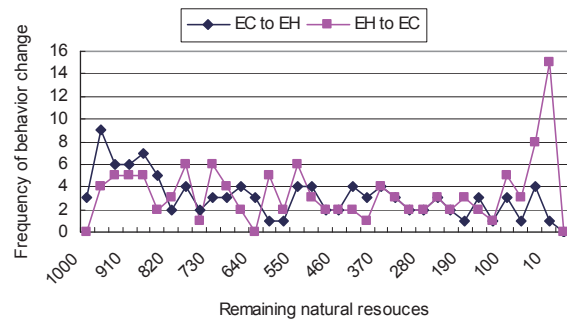


Figure 11: Relation between behavior change and remaining natural resources in treatment 4

decrease and disappear before exhausting natural resources in the limited resources game (treatment 4). The degraded resources game can be regarded as a representation of environmental problems for which exploitation of natural resources might engender negative effects in the distant future such as increasing greenhouse gases, atmospheric pollution, and deforestation. In this situation, environmentally conscious behavior to conserve natural resources is difficult. However, if people feel a sense of crisis, cooperative behavior might be elicited from environmentally hostile people because experimental results show that natural resources' depletion to zero elicits environmentally conscious behavior in treatment 1.

On the other hand, the limited resources game can be regarded as an environmental problem such that people cannot obtain benefit from natural resources if they are exhausted. This situation corresponds to problems such as overexploitation of mineral resources, oil, and other fossil fuels. People cannot receive benefits from these natural resources if they are exhausted through overexploitation: for example, people cannot perpetually use aluminum products if bauxite deposits become unavailable. In the limited resources game, a player can obtain no payoff if natural resources become fully depleted because the game is finished. Accordingly, it is implied that people who face the use of limited natural resources have a strong incentive to adopt environmentally conscious behavior.

Results of both the degraded resources game and the limited resources game imply that awareness of natural resource limitations might be powerful to compel people to halt environmentally hostile behavior.

6 CONCLUDING REMARKS

This study examined problems of environmentally conscious decision-making in resource consumption using experiments with human subjects. A decision-making model of a dilemma situation was constructed based on game theory. In the model, two types of game were prepared: a degraded resources game and a limited resources game. These experimental results suggest that environmentally conscious behavior depends on the properties of environmental problems. Especially, self-interested behavior might cease when humans become aware of a scarcity of natural resources.

7 REFERENCES

[1] Friedman, D., Sunder, S., 1994, *Experimental Methods: A Primer for Economists*, Cambridge University Press, Cambridge.

[2] Hertwich, E. G., 2005, Life Cycle Approaches to Sustainable Consumption: A Critical Review, *Environmental Science & Technology*, 39/13:4673-4683.

[3] Takese, K., Kondo, Y., Washizu, A., 2005, An analysis of Sustainable Consumption by the Waste Input-Output Model, *Journal of Industrial Ecology*, 9/1-2:201-219.

[4] Lenzen, M., 1998, Energy and Greenhouse gas cost of living for Australia during 1993/94, *Energy*, 23:497-516.

[5] Wier, M., Lenzen, M., Munksgaard, J., Smed, S., 2001, Effects of Household Consumption patterns on CO2 Requirements, *Economic Systems Research*, 13/3:259-274.

[6] Duchin, F. 1998, *Structural Economics: Measuring Changes in Technology, Lifestyles, and the Environment*, Island Press: Washington, DC.

[7] Duchin, F., Hubacek, K., 2003, Linking Social Expenditures to Household Lifestyles, *Futures*, 35/1:61-74.

[8] Hubacek, K., Sun, L., 2005, Changes in China's Economy and Society and Its Effect on Water Use: A Scenario Analysis, *Journal of Industrial Ecology*, 9/1-2:187-200.

[9] Greening, L., Green, D., Difiglio, C., 2000, Energy Efficiency and Consumption – Rebound effect – A Survey, *Energy Policy*, 28/6-7:389-401

[10] Hardin, G., 1968, The Tragedy of the Commons. *Science*, 162:1243-1248.

[11] Doves, R. M., McTavish, J., Shaklee, H., 1977, Behavior, Communication, and Assumption about Other People's Behavior in a Commons Dilemma Situation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 35/1:1-11.

[12] Davis, D. D., Holt, C. A., 1993, *Experimental Economics*, Princeton, NJ: Princeton University Press.

[13] Ledyard, J., 1995, Public Goods: A Survey of Experimental Research. In J. Kagel & A. Roth (Eds.), *The Handbook of Experimental Economics* (pp. 111-181), Princeton, NJ: Princeton University Press.

[14] Offerman, T., 1997, *Beliefs and Decision Rules in Public Goods Games: Theory and Experiments*, Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

[15] Ostrom, E., Gardner, R., Walker, J. M., 1994, *Rules, Games, & Common Pool Resources*, Ann Arbor: University of Michigan Press.

[16] Ostrom, E., 1990, *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, New York: Cambridge University Press.

[17] Herr, A., Gardner, R., Walker, J. M., 1997, An Experimental Study of Time-Independent and Time-Dependent Externalities in the Commons, *Games and Economic Behavior*, 19:77-96.

[18] Walker, J. M., Gardner, R., 1992, Probabilistic Destruction of Common-Pool Resources: Experimental Evidence. *The Economic Journal*, 102:1149-1161.

[19] Bru, L., Cabrera, S., Capra, C. M., Gomez, R., 2003, A Common Pool Resource Game with Sequential Decisions and Experimental Evidence. *Experimental Economics*, 6:91-114.

[20] Nishihara, K., 1997, A resolution of N-person prisoners' dilemma. *Economic Theory*, 10:531-540.

エラー付き指導者ゲームにおける戦略の進化

筑波大学 大学院システム情報工学研究科 秋山 英三

概要

エラー付きの「繰り返し指導者ゲーム」に関する進化シミュレーションを行った。エラーなしのケースに関する既存研究の結果と異なり、指導者と追随者の役割を固定化する方向の進化の過程が見られた。また、生き残った戦略にはすべてのシミュレーション試行について共通のポリシーが見られた。それは次の三つのポリシーである。(1)「上手く行動をコーディネートできない相手に、自分からは譲らない (2) いったん指導者の経験をすると積極的に振る舞う (3) 自分が指導者になった記憶がない場合、相手が常に積極的に指導者の経験もあるなら相手に追随する。

1 指導者ゲーム

目的地へと急いでいる二台の自動車が、交差点で渋滞の流れに割り込もうとしている状況を考えてみよう。それぞれの運転手は、車の流れに少し隙間ができた時に、積極的かつ大胆に隙間に飛び込む (D=Dive, Daring) か、慎重に相手の車に譲るか (C=Concede, Careful) を決断する。もし二台とも譲ってしまうと二台とも遅刻してしまう (2 番目に悪い結果)。もし二台ともあわてて飛び込むと事故が起こる (最悪の結果)。片方が隙間に飛び込んで、もう片方がそれに続けば、飛び込んだ方 (リーダー) が早く目的地に到着し、ほんの少し遅れてもう一台が到着する。このようなゲームのことを「指導者ゲーム [6]」と呼ぶ。このゲームを利得行列で表現すると、例えば表 1 のようになる。

表 1: 指導者ゲーム (The Game of Leader) の利得行列: それぞれのセルにおいて、左の数値は行プレイヤー (プレイヤー 1) の利得、右の数値は列プレイヤー (プレイヤー 2) の表す。

	C	D
C	(1, 1)	(3, 5)
D	(5, 3)	(0, 0)

このゲームには、C (消極的)、D(積極的) という二つの選択肢があり、二人のプレイヤーが別々の選択肢を選んだ状態が純粋戦略ナッシュ均衡でありパレート最適でもある。このような役割分業が成立したとき、本稿ではDを選択している方を「指導者」、Cを選択している方を「追随者」と呼ぶことにする。このゲームで最も得なのは指導者になることだが、そう思って両プレイヤーが積極的に行動してしまうと最悪の結果に陥ることになる¹。

指導者ゲームは Rapoport が分類した non-trivial な二人二戦略 (2x2) ゲームのうちの一つであり、その他のゲームの中には囚人ジレンマなどが含まれる [6]。繰り返し 2x2 ゲームにおける進化については、例えば、Crowley[2] が、前回の相手と自分の行動の記憶を用いる記憶長 2 の classifier system を用いて 1000 世代の進化を分析している。また Tanimoto ら [7] は、2x2 ゲーム全体をパラメータ表現することに成功し、ゲームの構造が、記憶長 2 の戦略の進化とゲームでの振る舞いに与える影響を総括的に検証している。(現実の指導者ゲーム状況の例はこれらの論文の中でも紹介されている)

表 1 では、(C,C) の時の利得 3 点の 2 倍、つまり 6 点よりも、(C,D)(D,C) の時の利得の和、つまり $3+5=8$ 点の方が大きいことに注意しよう。Browning ら [1] はこのようなゲームにおいて、二人が (C,D) 状態と (D,C) 状態を毎回交代する Alternating reciprocity が進化することを記憶長 6 の遺伝的アルゴリズムによって示した²。

一方、現実世界のプレイヤーにミス (エラー) は避けられないので、例えば、囚人ジレンマについては、エラー付き繰り返し囚人ジレンマの理論あるいはシミュレーション研究が数多く行われている (例えば [3],[4],[5],[8])。

では、エラー付きの繰り返し指導者ゲームにおける良い戦略とはどのような戦略だろうか？本稿では、エラー付き繰り返し囚人ジレンマを分析した Lindgren[4] のモデルをベースとして、エラー付きの繰り返し指導者ゲームにおける「良い」戦略を探る。次節で述べるように、各試行では 10 万世代の進化シミュレーションを行う。突然変異によって記憶長が変化しうるようにし、最大記憶長は 8 とした。分析するゲームは指導者ゲームに限っているが、途中の戦略進化の過程・論理を詳細に検証する。

¹指導者ゲーム的状况は、(1) 行動のコーディネーションがグループ内で行われると皆にメリットがあるが、(2) そのメリットは平等ではなく、積極的な者が得をするような状況で現れる。例として、捕食者から逃げる 2 匹の生物が、一度に一匹しか通ることができない逃げ道に行き着いた状況を考えよう。この場合、2 匹が行動を調整して、片方が先に通路を通り、もう片方がその後を追いかける状態が望ましい。最悪なのは、両方が通路に飛び込んで傷つけ合い、捕食者の餌になることである [1]。また、多くのグループワークでは、グループにリーダーがいる方が生産性が上がる。この時、リーダーになることに特権的な利益があると指導者ゲーム状況になる。(リーダーにぶら下がる人の方にメリットが大きい状況は「英雄ゲーム」と呼ばれる。)

²[1] の設定では、151 ラウンドの繰り返し 2x2 ゲームにおける進化を、population サイズが 20 の総当たり戦を前提とした 1000 世代の遺伝的アルゴリズムによって分析している。

2 モデル

本稿で用いるモデルにおけるシミュレーションの手続きとパラメータの値は、K. Lindgren (1992) の繰り返し囚人ジレンマゲーム進化シミュレーションの方法 [4] に基本的に基づいている。なお、シミュレーションは Global Public Goods Simulator を用いて行った [9]。

2.1 繰り返し指導者ゲーム

プレイヤーたちは指導者ゲーム (表 1) を T ラウンド繰り返しで行う。(つまり、 T =最大ラウンド数。) 以下、繰り返しゲームの一回分のゲームのことを以下「ステージゲーム」と呼び、各ステージゲームにおけるプレイヤーの選択肢のことを「行動」と呼ぶことにする。各プレイヤーは有限記憶長の決定論的「戦略」を持ち、過去のステージゲームにおける両プレイヤーの行動の履歴から次のステージゲームでの行動を決定する。つまり、プレイヤーの戦略は、過去の有限長の「履歴」を状態として次の行動を決定するムーアマシンである。

なお、本稿では、プレイヤーの行動にエラーが起こることが仮定される。つまり、プレイヤーは、一定の確率 p で、意図したのと逆の行動を選択してしまう (間違える)。また、プレイヤーが間違える時間間隔の期待値は、最大ラウンド数より十分に小さく、記憶長 m より十分大きいことが仮定される ($T \gg 1/(1-(1-p))^2 \gg m$)。つまり、エラーはたまにしか発生しないが、 T ラウンドが終わるまでの間には十分な回数のエラーが発生する³。

各プレイヤーが記憶する記憶長 m の履歴は、対戦相手の前回の行動 a_0 、自分の前回の行動 a_1 、対戦相手の前々回の行動 a_2 、自分の前々回の行動 a_3 、... のように両プレイヤーの過去の行動の列で構成される。行動 D を 0、行動 C を 1 と書くことで、長さ m の履歴 h_m を $h_m = (a_{m-1}, \dots, a_1, a_0)_2$ のように二進コードで表現することができる。

記憶長 m のプレイヤーが出会う可能性がある履歴は $(0, \dots, 0, 0)_2, (0, \dots, 0, 1)_2, \dots, (1, \dots, 1, 1)_2$ の 2^m 種類ある。本稿では決定論的戦略を仮定しているので、これらの履歴それぞれに出会ったときに行う行動 A_0, A_1, \dots, A_{m-1} は一意に決まる。従って、記憶長 m の戦略は、長さ m の二進コード $S = [A_{n-1}, \dots, A_1, A_0]$ で表現することができる⁴。例えば、記憶長 $m = 1$ の二進コード [10] で表現される戦略は、前回相手が C なら C を、D なら D を選択する戦略である。「記憶長 m の戦略」の種類総数は 2^{2^m} である。以下、この二進コードの戦略のことをこの節ではゲノムと呼ぶことにする。

³実行時に意図したのと逆の行動を選択してしまうことを implementation error、相手の行動を間違えて知覚してしまうことを perception error 呼ぶことが多い。

⁴Lindgren の原論文では、左端から $S = [A_0, A_1, \dots, A_{n-1}]$ となっている。本稿では履歴番号を二進コードの桁数にしたかったので逆順に変更したが、分析に本質的な違いは全くない。

この繰り返しゲームにおける各プレイヤーのパフォーマンスは T ラウンドの平均利得によって決まる。 $T \gg 1/(2p - p^2) \gg m$ を仮定しているので「1 ラウンド目の行動の選択」が平均利得に与える影響は微少である。[4] では $T \rightarrow \infty$ を仮定することで1 ラウンド目の選択の影響を排除し、さらに、有限記憶長履歴の定常分布を考えることで平均期待を解析的に計算していた。本稿の全てのシミュレーションでは、 $T = 10,000, p = 0.01$ と設定し、また、1 ラウンド目の選択をランダムとして実際に繰り返し対戦させ、ラウンド当たりの平均利得を計算している⁵。

2.2 進化ダイナミクス

「繰り返し指導者ゲーム」が行われる世界で、どのような戦略が現れ広がっていくかを見るために、遺伝子 (戦略) の突然変異による変異の創造、遺伝、自然選択のメカニズムを導入し、進化のダイナミクスを分析する⁶。

まず、 N 個体からなる population を考える。(本稿では N は 1000 に設定している。) population 内の個体は他個体と出会うと繰り返し指導者ゲームを行う。

まず、同じ戦略を持つ個体は同じ「種族」に属すると考える。種族 i の個体数は、1.0 を全体にした割合 (頻度) x_i で表される。個体は同族集団も含めたすべての個体と戦う⁷。種族 i, k に属する個体どうしが、繰り返しゲームを行なった結果、1 ラウンドあたりで種族 i の個体が獲得する平均利得を g_{ij} とすると、種族 i の個体が population の全ての個体とゲームを行なって獲得する利得は $s_i = \sum_j g_{ij} x_j$ である。従って、システム全体の平均利得は $s = \sum_i s_i x_i$ となる。平均利得がシステム全体の平均を上回るかどうかで各種族の適応度を測る。種族 i の適応度は $w_i = s_i - s$ で表される。そして、世代 t から $t + 1$ にかわるにあたって、適応度に応じて次の世代の各種族の頻度が $x_i(t+1) - x_i(t) = dw_i x_i(t) + m_i$ に従ってきまる。ここで、 d は growth constant で本稿では 0.1 に設定している。また、 m_i は突然変異による頻度の増減の項だが、これについては後述する。

平均利得が population 全体の平均 s より低い種族は次の世代で頻度を減らすことになるが、その時、頻度がしきい値 $1/N$ より少ない種族は絶滅する。絶滅した種族が現れたら全体が 1.0 になるように頻度を正規化する。

突然変異には (1)point mutation (2)gene duplication (3)split mutation の三種類がある。point mutation では、[0010]→[0110] のように、ゲノム (戦略)

⁵10,000 ラウンド中に約 200 回のエラーが発生するので初期行動の影響はほとんど無い。実際、囚人ジレンマの利得行列を用いるとシミュレーションの結果が Lindgren の結果とほぼ同様の傾向を持つことを確認している。

⁶本稿で用いている進化ダイナミクスは基本的に離散時間レプリケータと呼ばれるものだが、標準的レプリケータと異なるのは、戦略の数が突然変異と淘汰によって増減しうるところである。

⁷対戦確率が戦略頻度に比例する well mixed な population なら、ランダムに対戦すると考えても同様の結果になる。

中のシンボルが変化する。gene duplication では $[10] \rightarrow [1010]$ のように、自分自身のコピーを追加する。この過程で戦略の内容は変わらないまま記憶長が長くなっていることに注意しよう。split mutation は $[0011] \rightarrow [00]$ のように、ゲノムを前半部と後半部に分割し、どちらかをランダムに捨てる。本稿では、point mutation が発生する確率は各シンボルごとに $p_p = 2.0 \times 10^{-5}$ 、(2)gene duplication と (3)split mutation が発生する確率はそれぞれ $p_g = p_s = 1.0 \times 10^{-5}$ としている⁸⁹。

3 指導者ゲームにおける戦略の進化

以上の設定で、「繰り返し指導者ゲーム」の10万世代の進化シミュレーションを行った。初期世代は、記憶長1の4戦略 $[00][01][10][11]$ (繰り返し囚人ジレンマではそれぞれ AllD, Anti-TFT, TFT, AllC と呼ばれる戦略) が population の1/4ずつを占める状態から始めた。シミュレーションは、突然変異時の乱数によって試行ごとに異なる結果に分岐していく。gene duplication によって記憶長の伸張が可能だが、計算機の記憶領域の制限から最大記憶長は8に制限した。ただし、現れてすぐに絶滅せずに残ったのは記憶長6までの戦略で、現れた戦略のほとんどは記憶長5までだった。

10万世代までのシミュレーションを8試行行ったが、全体的な傾向は大きく分けて二通りある。一つは図1-(a)のように記憶長が4を超えて4と5の間を振動するもの、もう一つは図1-(b)のように記憶長が4以上にならないものである。前者では、平均利得が3.1点前後と3.9点前後を往復し、後者では3.1点前後に(10万世代の段階で)落ち着いている。

以下では、図1-(a)のシミュレーションで見られた戦略の進化の概要を時間(世代)に沿って紹介し、(1)エラー付き指導者ゲーム世界における戦略進化にはどのようなパスが有り得るのか、(2)(10万世代の時点で)どのような戦略が優勢になるのかを考察する。

(1)に関しては、突然変異の起こり方によって進化の速度・様相が異なり、シミュレーションごとに同じ部分と異なる部分がある(あるシミュレーションのある世代で現れた戦略が他のシミュレーションではスキップされるなど)ので、当然ながら、一つの進化のパスの紹介ということになる。エラーのあるゲーム的相互作用を通じてムアマシンがどのように複雑化していくのかを分析した例としては、エラー付き囚人ジレンマについては Lindgren の著

⁸なお、ゲノムの各サイトを遺伝子座とみなし、各シンボルを対立遺伝子とみなすと、実際の生物とはほぼ同じ突然変異率になる。

⁹以上三つの突然変異によりゲノム j からゲノム i への突然変異が起こる確率を q_{ji} とすると、ゲノム j を持つ個体の数は Nx_j なので、ゲノムが j から i に変化する個体の数の期待値は $Nx_j q_{ji}$ である。ゲノム j からゲノム i を持つ個体が一つ現れる場合に値1をとる確率変数を Q_{ij} とすると、本稿のように突然変異率非常に小さく $p_p + p_d + p_s \ll 1/N$ となる場合、 $P(Q_{ij} = 1) = Nx_j q_{ij}$ と近似できる。従って、突然変異による頻度の増減の項 m_i は $m_i = \frac{1}{N} \sum_j (Q_{ij} - Q_{ji})$ となる。

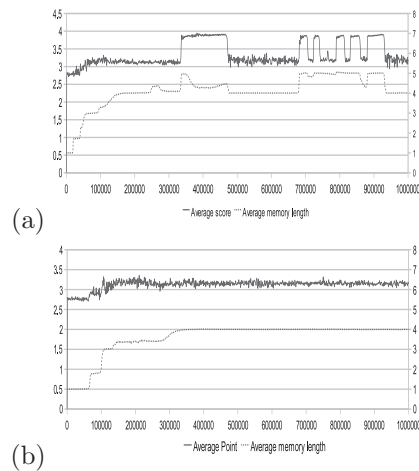


図 1: population における平均利得と平均記憶長の遷移の典型例。(a)(b) とも横軸は世代。左側の縦軸は各世代の平均利得、右側の縦軸は平均記憶長の値を表し、前者のデータは実線、後者のデータは点線で示されている。シミュレーションの結果は、大きく分けて、(a) のように記憶長が 4 を超えて 4 と 5 の間を振動するものと、(b) のように記憶長が 4 以上にならないものの二通りがある。

名な研究があるが、エラー付き指導者ゲームに関しては本研究が初めてである。(2) に関しては全シミュレーションに共通する性質で、おそらく、一定の普遍性があるものと思われる。

3.1 第 1,000 世代: 記憶長=1 の戦略 [00] と [01]

第 1,000 世代では記憶長が 1 の戦略 [00] と [01] がそれぞれ 1 位と 2 位の頻度 (population 内での個体数の割合) を獲得していた。[00] は常に D(積極的)、[01] は前回の相手と逆の行動をする。従って、[00] プレーヤーが [01] プレーヤーと出会うと、

```
[00] ... D D D D D ...
[01] ... C C C C C ...
```

のように、「[00] プレーヤーが指導者で [01] プレーヤーが追随者」のように役割が固定化されて、両者の利得の和が最大化される。その意味で、ここでは両者の行動のコーディネーションが実現される。このように、(1) 片方のプレーヤーが D を選択肢続けて (2) もう一人のプレーヤーが C を選択し続ける状態、つまり、役割が固定化されて「指導者+追随者」のコーディネー

ションが実現した状態を、以降、「(固定化した)CD 役割分業」と呼ぶことにする¹⁰。

この二戦略による CD 役割分業はエラーに対して頑強である。仮にどちらかのプレイヤーの行動にエラーが発生しても、[00] は自分が間違えたラウンドを除けば D を選択続け、また、[01] はその反対を選択するので、即座に CD 役割分業に復帰することができる。

ただし、これら記憶長 1 の戦略には「同戦略どうしの対戦で行動のコーディネーションができない」という問題がある。例えば、[00] どうしでは両方が共に D を出し続けて譲らないので最悪の結果になる。[01] どうしの場合、前回のお互いの行動の逆を行おうとするので、指導者－追従者関係が一旦形成されればそれは維持されつづける。しかし、エラーが発生すると、次のように、コーディネーションが崩れてしまう。

[01] D D D D C D C D C ...

[01] C C C D C D C D C ...

* (* 印はエラー)

このように、一旦、エラーで CD 役割分業が崩れると、次のエラーによって CD 役割分業が形成されるまでコーディネーション状態は回復しない。

3.2 第 2,000 世代: 記憶長 2 の戦略 [0100]

第 2,000 世代では、記憶長が 2 の戦略 [0100] の頻度が最も多く、次に [01] の頻度が多かった。まず [0100] のポリシーを見てみよう。

1 1 0 0 (f1) 前回の自分 (focal player) の手

1 0 1 0 (o1) 前回の相手 (opponent) の手

[0 1 0 0] 次の手 (=戦略:以下その解釈)

0 (a) 前回自分が指導者だったら D

1 (b) 前回相手が指導者なら C

0 0 (c) 前回行動が衝突したら D

[0100] は記憶長が長くなり、前回の相手の行動だけでなく、自分の行動も考慮に入れることができるようになっている。(a) まず、戦略 [0100] の右から 2 番目の「0」は、履歴 $(0, 1)_2$ 、つまり前回の自分の行動が D、前回の相手の行動が C の時に次の手は D ということを表している。つまり、前回「自分が追従者で相手が指導者」というコーディネーションができていたら再び指導者を目指す。(b) 次に [0100] の右から 3 番目の「1」は、履歴 $(1, 0)_2$ 、つまり前回

¹⁰Crowley[2] の CorD に相当する。

の自分の行動が C、前回の相手の行動が D の時に次の手は C ということを表している。つまり、前回「自分が指導者で相手が追従者」というコーディネーションができていたら再び指導者を目指す。(c)最後に、前回の両者の行動が C、あるいは、両者の行動が D の時も指導者を目指して D を出す。[01] は単に前回の相手の行動の逆を選択するが、[0100] が [01] と違う点は、前回両者とも D の場合に D を選択する点である。

[0100] が [01] と対戦では、両プレイヤーの行動が (C,C) なら次は (D,D)、(D,D) なら次は (D,C) になるので、次のように CD 役割分業が実現して、[0100] が指導者、[01] が追従者になる。

```

+ + rule (c)
[0100] ... C D D D D D ...
[01] ... C D C C C C ...

```

また、(D,C) 状態でエラーが発生すると必ず (C,C) か (D,D) になるので、その次で CD 役割分業に戻ることができる。つまり、この両者のコーディネーションはエラーに強い。エラーからの回復は次のように行われる。

```

* + + + rule (c)
[0100] D D C D D D D D D D D D ...
[01] C C C D C C C C D C C C ...
*

```

(+印は上記のルール (c) が適用された場所)

[0100] は [00] のように無条件に D を選択する訳ではなく、CD 役割分業を維持する構造があるので、[00] よりはコーディネーションに成功する。しかし、一旦エラーが起きて行動の衝突が起きて (D,D) 状態に入ると、次のエラーが起こるまで (D,D) 状態から回復できない。

```

+ rule (c)
[0100] C C C C D D D D ...
[0100] D D D C D D D D ...
* + rule (c)

```

3.3 第 5,000 世代: 記憶長 3 の戦略 [01001100]

第 5,000 世代では、記憶長が 3 の戦略 [01001100] の頻度が最も多く、次に [0100] の頻度が多かった。[01001100] は 10000 世代まで 1 位の頻度を保ち続ける。以下、簡便さのため、この戦略のことを S_1 と呼ぶことにする。この戦略の方針は以下のルール群からなる：(a)「前回自分が指導者なら D」という記憶長 2 のルール。(b)「前回相手が指導者なら C」という記憶長 1 のルール。(c)「前回両者の行動が衝突して、前々回に相手が C だったら D」という

記憶長3のルール。(d)「前回両者の行動が衝突して、前々回に相手がDだったら、前回と同じ行動を続ける」という記憶長3のルール。

大きく分けると、(a)(b)は一旦CD役割分業になった後にコーディネーションを続けるためのルール、(c)(d)は前回コーディネーションに失敗したときのルールである。

記憶長3のルールを持つ S_1 は、前々回の記憶まで参照できるので、エラーが発生したときでも、二回前の行動の情報を参照することでCD役割分業を復活できる。例えば、 S_1 どうしが対戦すると次のようになる。

```
+ rule (d)
S1 C C C C C C...
S1 D D C D D D...
* + rule (c)
```

エラーが発生した*印のところで両者の行動が同じになっているが、前々回の行動はお互い異なるので、その情報を参照してCD役割分業を再開している。

次に、 S_1 が、頻度二位の戦略[0100]と対戦したとき、 S_1 が指導者の状態からスタートすると次のようになる。

```
+ + rule (c)
S1 ... D D D D D...
[0100] ... C C D D D...
* (* はエラー)
```

つまり、 S_1 が指導者になるCD役割分業はエラーに弱く維持できない。一方、 S_1 が追随者になるCD役割分業は、次のようにエラーに強い。

```
+ rule (e)
S1 ..C C C C C C..
[0100] ..D D C D D D..
*
```

このように、 S_1 は追随者として[0100]と安定したCD役割分業を実現することができる。

上述のように[0100]どうしが対戦するとエラーによりコーディネーションの失敗が起こるので、 S_1 は、[0100]どうしの時に比べて（指導者にはなれないものの）[0100]に対するbetter responseになる。

以上のように、populationで[0100]が増えすぎると S_1 が有利になり、 S_1 が増えすぎると[0100]が指導者になって有利になるという構造があるので、 S_1 と[0100]はタカ・ハトゲームと類似のメカニズムで共存する。ただし、[0100]どうしの対戦ではコーディネーションの失敗が起こりうるのに対し、 S_1 どう

しの対戦ではコーディネーションの失敗から回復できるので、population 内の頻度は S_1 が多くなる¹¹¹²。

3.4 第2万世代: 記憶長4の戦略 [0100 1101 0100 0000]

第2万世代では、記憶長が4の戦略 [0100 1101 0100 0000] の頻度が最も多い。以下、簡便さのため、この戦略のことを S_2 と呼ぶことにする。この戦略の方針は以下のルール群からなる：(a) 「前回自分が指導者なら D」という記憶長2のルール。これは戦略 S_1 のルール (a) と同じである。(b-0) 「(b-1) のケースを除き、前回相手が指導者なら C」というルール。(b-1) 「前回相手が指導者でも、前々回に (D,D) なら D」という記憶長4のルール。(c-0) 「両者の行動が2回続けて同じなら D」という記憶長4のルール。(c-1) 「前回両者の行動が同じでも、前々回に役割分担が成立していたら、前々回と同じ行動を行う」という記憶長4のルール。

ルール (b-1) は、(D,D) 状態からエラーで自分が C を選択してたまたま追随者になったときに、そのまま追随者でいることを許さない。つまり、 S_1 のように、簡単に追随者になることはない。

また、(c-0) は、コーディネーションの失敗が二回続く相手に対して自ら譲ることを許さないルールで、繰り返し囚人ジレンマのいわゆる「引き金戦略」と類似の方針を持つ。つまり、(a)(b-0)(b-1) でこの戦略が求めているコーディネーションのルールに従わないと、この戦略は D を選択するので、コーディネーションを破った方も追随者にならない限り損をする。

ルール (c-1) により、前回エラーでコーディネーションの失敗が起こっても、前々回の状態からコーディネーションを復活できる可能性がある。例えば、 S_2 どうしが対戦するとき、D を選択すべき場面で C を選択するエラーが発生しても、それが一回だけなら、次のように、即座に CD 役割分業を回復できる。

```

+ rule (c-1)
...C C C C C C C...
...D D D C D D D...
* + rule (c-1)

```

ただし、C を選択すべき場面で D を選択するエラーの場合、CD 役割分業を完全には回復できない。

¹¹ 以上は直感的な説明だが、数学的には、[0100] と対戦したときの S_1 と [0100] の利得の差 $E(S_1 - [0100] | [0100])$ が、 S_1 と対戦したときの [0100] と S_1 の利得の差 $E([0100] - S_1 | S_1)$ を上回ることに注意して進化的安定戦略を求めることにより示すことができる。

¹² 以上まとめると次のようになる。第5,000世代では、記憶長3の戦略 $S_1 = [01001100]$ が現れて、[0100] と共に population の多くを占めるようになる。 S_1 は、エラーによるコーディネーションの失敗が起こっても、前々回の相手の行動の情報から CD 役割分業を復帰させることができる。ただし、 S_1 は [0100] に対して追随者になるので、完全に population を支配することはできない。

```

      + + (c-1)(a)
...D D D D D D D D...
...C C C D C D C D C...
      * + + (c-1)(b-1)

```

ルール (b-1) は、(D,D) 状態の後に継続して追随者になることを嫌うルールで、ルール (c-0) とあわせると、コーディネーションが失敗した相手に対してエラーをきっかけに追随者になることを防いでいる。他戦略の追随者の立場に陥りやすいという S1 戦略の欠点がある程度修正しているが、一方で、最後に示したように S₂ どちらの安定したコーディネーション形成の障害にもなっている。

以上をまとめると次のようになる。第 2 万世代では、行動のコーディネーションがなかなか (二回連続で) できない相手には譲らない記憶長 4 の戦略 S₂ が現れる。エラーをきっかけに自分が追随者になってしまうのを防ぐメカニズムを持っているが、そのことが同戦略どちらの行動のコーディネーションを妨げる場合がある。

3.5 第 4 万世代の記憶長 4 の戦略 [0100 0101 1100 0100]、第 8 万世代

第 4 万世代は平均利得が約 3.9 点と非常に高くなっているが、記憶長が 4 の戦略 [0100 0101 1100 0100] の頻度が最も多い。以下、簡便さのため、この戦略のことを S3 と呼ぶことにする。この戦略の方針は以下のルール群からなる：(a)「前回自分が指導者なら D」という記憶長 2 のルール。(b)「前回相手が指導者なら C」という記憶長 1 のルール。(c-0)「両者の行動が 2 回続けて同じなら D」という記憶長 4 のルール。一種の引き金戦略の性質を備えさせている。(c-1)「前回両者とも C でも、前々回に役割分担が成立していたら、その前々回と同じ行動を行う」というエラーからの回復ルール。(c-2)「前回両者とも D でも、前々回に役割分担が成立していたら、その前々回と逆の行動を行う」という (c-1) と逆方向のエラー回復ルール。

ルール (c-0) は、一種の引き金戦略で、上記 (a)(b)(c-1)(c-2) のルールに従わず (C,D) 状態が二回連続で成立しないと、その時の相手には D を出す。ルールを破ると DD 状態になるのでルールを破った方も損をする。DD 状態になると D 以外出さないで、相手は C を出す以外回復の道はない。

また、ルール (c-1)(c-2) に従っている限り、エラーが起こっても、次のように即座にコーディネーション状態に回復できる。

```

      + rule (c-2)
S3 ..D D D D C C C..
S3 ..C C C D D D D..
      * + rule (c-2)

```

この例のように、ルール (c-2) が適用される時に C と D の役割の交代が起こるため、両プレイヤーは長期的にはほぼ同等の得点を獲得することができる。

自分が追隨者の役割に固定されている場合、対戦相手 (指導者) が自分と同じ戦略なら、戦略レベルの利得は高くなる。しかし、相手が「似ているけど異なる戦略」の時には、相手の戦略だけに指導者としての得点を献上してしまうことになる。長期的な役割の交替は、それを防ぐことができる。ただし、この役割交替を悪用される可能性がある。例えば、前々回まで自分が指導者でも、前回、相手が意図的に D を出せば、相手に指導者の立場を奪われる¹³。

3.6 第 10 万世代 – 指導者ゲームにおける良い戦略 [0#00 #101 0000 0100]

第 10 万世代での人口頻度上位三戦略は、[0000 1101 0000 0100], [0100 0101 0000 0100], [0000 0101 0000 0100] である。これらの戦略は、#印を 0 または 1 として、[0#00 #101 0000 0100] というシンボル列を共通して持っている。

[0#00 #101 0000 0100] は、他の全てのシミュレーション試行における第 10 万世代の最有力戦略でも共通の部分となっている。このことから、# 印以外の部分が特にエラー付き指導者ゲームにおいて重要な部分であることが予想される。簡便さのため、以降、[0#00 #101 0000 0100] のことを $S_{\#}$ と書くことにする。

戦略 $S_{\#}$ の方針は以下のルール群からなる：(a) 「両者の行動の衝突が 2 回続いたら D」という記憶長 4 のルール。(b-1) 「自分が前回に指導者だったら D」という記憶長 2 のルール。(b-2) 「自分が前々回に指導者だったら D」という記憶長 4 のルール。(c) 「相手が二日とも D で、しかも相手が一度以上指導者になっていたら C」という記憶長 4 のルール。

ルール (a) は、コーディネーションルールを続けて violate する相手には妥協しない、という方策であり、第 2 万世代、4 万世代でも既に現れている。ルール (b1)(b2) は、覚えている範囲 (前回と前々回) で自分に指導者の経験があったら積極的に D を選択する、という方策で、指導者の経験 (記憶) があると積極的になることを示している。ルール (c) は、ルール (b1)(b2) とは逆に、相手に指導者の経験があるときにどうするかについてのルールであるが、相手がずっと (前回も前々回も) 積極的に D を選択している場合にのみ、C を選択して追隨者を目指すということを示している。これにより、例えばエラーによってたまたま指導者になった相手に追隨してしまう可能性を排除している。

¹³紙面の都合で詳細は省略するが、第 8 万世代には記憶長 5 の戦略が優勢になる。この記憶長 5 の戦略は、役割交替のルールを複雑化することで一方的に指導者の立場を奪われるリスクを減らしている。

4 議論

本稿では、エラー付きの繰り返し指導者ゲームにおける戦略の進化を Lindgren モデル [4] を用いて分析した。ここでは、エラー付き指導者ゲーム社会での戦略(ムーアマシン)の進化にはどのような過程がありうるのかと、進化を経た結果としてどのような戦略が指導者ゲームにおいて優勢になっているのかについて議論する。前者については、シミュレーションによって戦略が現れるタイミング等に違いがあるが、本稿で紹介した図 1-(a) タイプの試行の典型例について簡単にまとめる。後者については第 10 万世代の時点でほぼ共通する構造がみられたのでその構造について議論する。

4.1 戦略進化の経路

上記で紹介したように、エラー付きの繰り返し指導者ゲーム世界において、戦略は、記憶長を徐々に伸ばしたり戦略の内容を修正したりして、過去の戦略の問題点を徐々に修復しながら進化する様子が見られる。

初期の世界では、周りに関係なく常に積極的な戦略と、単に相手の逆の行動を目指すあまのじゃく戦略の共存が見られた。ここでは、積極的な者どうし、あるいは、あまのじゃくどうしが出会ったときに行動のコーディネーションで問題が起こった。しばらく後の世代になると、前々回の相手の行動まで参照することによってコーディネーションの失敗から回復する戦略 (S1) が現れた。しかし、この戦略には相手に合わせすぎて自分が追随者になる頻度が多くなる傾向があった。さらに後の世代になると、前々回の相手と自分の行動まで参照して、連続して役割分業ができなかった相手にはその後は譲らないという一種の引き金戦略のような戦略が現れて、より堅固なコーディネーションを行うようになった。さらに第 10 万世代までの進化を経た戦略には、次に議論するように $S_{\#}=[0\#00 \#101 0000 0100]$ という共通のコードが現れることが分かった。

Browning によるエラーなしのケースの研究では、記憶長 6 のエージェントにより、ステージゲームごとに C と D の役割を入れ替える Alternating reciprocity (AR) が見られた [1]。一方、本研究の結果から分かるように、エラー付き指導者ゲームでは進化の過程でも最後 (10 万世代) でも AR は見られず、ほとんどの戦略が固定化した役割分担 (片方のプレイヤーが指導者を続ける) を目指して進化する。

4.2 エラー付き指導者ゲームに適した戦略

最終的に全てのシミュレーションで共通に見られた戦略 $S_{\#}$ は、同じ戦略、同種戦略どうしの間で CD 役割分業を行うことが可能になっており、また、エラー等によって立場が変われば同じ戦略でも逆の振る舞いをする。例えば、

戦略は全く同じでも、過去の経験によって「積極的な人」と「相手の顔を伺う人」に分岐する。このような振る舞いを可能にする戦略 $S_{\#}=[0\#00 \#1010000 \ 0100]$ には以下の3つのポリシーがある。

まず一つめは「上手く行動をコーディネートできない相手に、自分からは譲らない」というポリシーである。両者が譲らなくなると、どちらかのプレイヤーが(エラーによって、あるいは、戦略的に)譲るまで、最悪の状態が続くことになる。コーディネーションが成立しなくなった時をきっかけに攻撃的な戦略を選ぶ、という点で、繰り返し囚人ジレンマの引き金戦略と類似点がある。

二つめは、「いったん指導者の経験をすると積極的に振る舞う」というポリシーである。ノイズなしのケースに関する研究 [1] では、指導者になると次のステージゲームでは消極的になるので対照的な結果である。

三つ目は、「自分に指導者になった記憶がない場合、相手が常に積極的に指導者の経験もあるなら相手に追従する」というポリシーである。つまり、自分に指導者の経験がない時には、まず相手の様子をうかがい、相手が確実に指導者であることを確認したら(つまり、相手が指導者の場合も、偶然指導者になったのではなく、普段から積極的であることを確認したら)相手に追従する。

以上のようなポリシーで行動する実際の人間がどの程度いるのかは、厳密には被験者実験等で検証する必要があるが、本研究が示唆するのは、ノイズ付き指導者ゲームのような相互作用がある場合、進化の結果として、以上のようなポリシー・戦略が生き残る可能性があるということである¹⁴。

参考文献

- [1] Lindsay Browning and Andrew M. Colman. Evolution of coordinated alternating reciprocity in repeated dyadic games. *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 229, No. 4, pp. 549–557, August 2004.
- [2] Philip H. Crowley. Dangerous games and the emergence of social structure: evolving memory-based strategies for the generalized hawk-dove game. *Behav. Ecol.*, Vol. 12, No. 6, pp. 753–760, November 2001.
- [3] D. Fudenberg and E. Maskin. Evolution and cooperation in noisy repeated games. *American Economic Review*, Vol. 80, No. 274-279, 1990.
- [4] K. Lindgren. Evolutionary phenomena in simple dynamics. In C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, and S. Rasmussen, editors, *Artificial Life II*, pp. 295–312. Addison Wesley Publishing Company, 1991.

¹⁴今後の課題の一つとして、世代数とシミュレーションの試行回数を増やして、本研究の結果の頑健性をチェックする必要がある。

- [5] M. Nowak and K. Sigmund. Chaos and the evolution of cooperation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 90, No. 11, pp. 5091–5094, June 1993.
- [6] Anatol Rapoport. Exploiter, leader, hero, and martyr: The four archetypes of the 2x2 game. *Behavioral Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 81–84, 1967.
- [7] Jun Tanimoto and Hiroki Sagara. A study on emergence of alternating reciprocity in a 2x2 game with 2-length memory strategy. *Biosystems*, Vol. 90, No. 3, pp. 728–737, 2007.
- [8] J. Wu and R. Axelrod. How to cope with noise in the iterated prisoner's dilemma. *Journal of Conflict resolution*, Vol. 39, pp. 183–189, 1995.
- [9] 齋藤宗香, 山口裕, 八槇博史, 秋山英三, 瀬島誠, 吉田和男. 国際政治・経済研究のためのシミュレーション環境 gpgsim の開発. In *The Proceedings of the Joint Agent Workshop 2008*, 2008. (電子プロシーディングス収録).

Contributing for myself, but free-riding for my group?

Yoshio Iida
(Kyoto Sangyo University)

Christiane Schwiieren
(University of Heidelberg)

Abstract:

Is there a general difference between a decision made as an individual and one made as a representative of a group in a public goods game? The experimental study we conducted shows that the results are not simple: representatives contributed less than the individuals when they couldn't discuss with their constituency. However, when they could discuss, they contributed nearly the same amount as did the individuals. Furthermore, when they could discuss before and after making a decision, they contributed even more than did individuals. The strength of the effects in Japan was weaker than that in Spain.

Yoshio IIDA
Faculty of Economics, Kyoto Sangyo University
Motoyama, Kita-ku, Kyoto 603-8555, Japan.
Phone: +81-75-493-2854.
e-mail: iida01@cc.kyoto-su.ac.jp

This research was supported by Grant-in-Aid for (B) No. 15730145 and a research project "Experimental Economics: A New Method of Teaching Economics and the Research on Its Impact on Society", both of them are funded by the Ministry of Education, Science, Sports and Culture of Japan.

Contributing for myself, but free-riding for my group?

Abstract:

Is there a general difference between a decision made as an individual and one made as a representative of a group in a public goods game? The experimental study we conducted shows that the results are not simple: representatives contributed less than the individuals when they couldn't discuss with their constituency. However, when they could discuss, they contributed nearly the same amount as did the individuals. Furthermore, when they could discuss before and after making a decision, they contributed even more than did individuals. The strength of the effects in Japan was weaker than that in Spain.

I. Introduction

People who make decisions often do so not for personal gain but as representatives of a group. Think of labour-union leaders, representatives of firms, or representatives of local neighbourhood-committees negotiating for their respective groups. Surprisingly, very little experimental economic research has studied the impact of decisions made by group representatives. This study examines the negotiations of group representatives who are more or less accountable to their group and discuss their negotiating behaviour more or less in detail with their group before beginning their negotiations.

A growing number of economics and psychology studies have compared group decision-making with individual decision-making. Generally, these studies asked groups to arrive at a unanimous decision through discussions (face-to-face or using a chat program) without specifying a decision rule (e.g., Kugler et al., Bornstein and Yaniv, 1998, Luhan et al., Cason and Mui, 1997, Wildschut et al., 2001), or aggregated individual decisions with or without communication within a group before a decision is made (e.g., Bornstein and Ben-Yossef, 1993, Bornstein, Mingelgrin and Rutte, 1996, Wildschut et al., 2001, Lodewijkx and Rabbie (1992)). Groups often act more "rational" in an economic sense, and are more competitive than individuals (e.g., Bornstein 2003, Bornstein et al., 2004). None of these studies have used group representatives.

Psychological negotiation studies focus mainly on the effect of accountability on negotiator behaviour. Pruitt and Carnevale (1993) give a good overview of the literature on negotiations by representatives. They state that accountability changes the behaviour of an individual as compared to interacting on their own behalf. Most

studies have found that the subjects were more competitive and less willing to concede to the other party when they were accountable. A very early study by Klimoski and Ash (1974) showed that the mode of representative selection interacted with the effect of accountability and influenced the results of negotiations. The elected representatives in their study were not affected by different accountability conditions, while randomly selected representatives performed worse in negotiations when they were held accountable (taking longer to reach agreement and being less cooperative). This is in line with the results reported by Benton (1972) that showed that negotiators who are held accountable have greater difficulty coming to an agreement with their counterpart. More recently, De Cremer and Bakker (2003) found that accountability leads to more cooperation in social dilemmas when the decision makers believe that others in their group will evaluate non-cooperation negatively. In their experiments, this effect became stronger as feelings of collective concern became stronger. This is in line with earlier results by Benton and Druckman (1974) who found that negotiators behaved less competitively when told that their constituency expected cooperative behaviour. Pinter et al., (2007), studied the effects that accountability, interdependence, and a personality characteristic, guilt proneness, have on cooperation or group leaders in social dilemmas. Their study is very relevant to our paper, as the structure of their interacting groups is quite similar to ours. They found that accountable leaders were more competitive than individuals, especially when they were guilt-prone, while unaccountable leaders were as cooperative as the individuals in their study. The authors explain this as different norms becoming salient. When acting as individuals or as unaccountable leaders, a general cooperative norm is salient. When acting as an accountable leader, group norms are more salient, and they require acting in behalf of the self-interest of one's in-group.

With respect to theoretical analyses of decisions made by group representatives, the negotiation literature describes some models. For example, Raiffa (2002) analyses situations in which the negotiating parties are not monolithic but are represented by a single negotiator. Models can quickly become quite complex and, for our purposes, these models do not need detailed descriptions.

Both experimental psychology and experimental economics study the effects of communication on group opinions and group behaviour. The psychology literature on the effects of group communication on decision-making has shown that the preferences of the members of a group often change and the collective decision is altered, sometimes toward a more extreme decision, in favour of a convergence of the alternatives. (For an overview see Wittenbaum and Stasser, 1998.)

Economists and game theorists interpret as “cheap talk” any communication in bargaining situations that does not lead to binding results. Such communication should have no effect on the bargaining behaviour in a game with a single equilibrium.

However, many experiments show that this is not the case. Druckman (1968) describes how unstructured discussion among teammates or with an opposing representative facilitated conflict resolution. Sutter and Strassmair (2005) showed that intra-team communication in a team tournament increased the efforts of the team, while inter-team communication led to collusion between teams. Communication in their experiments generally facilitated the coordination of actions. Bornstein et al., (1996), reviewed some of the relevant literature and showed in their own experiments a similar tendency in chicken and assurance games. Inter-team communication increased cooperation within the team for the games between teams. This result is qualified in a later study by Bornstein and Gilula (2003) that applied intra- and inter-team communication. Teams playing the assurance game do manage to reach a collectively efficient outcome, while teams playing the chicken game do not. The authors interpret this finding as communication being efficient in reaching a peaceful solution to a conflict if the conflict is motivated by fear, as in the assurance game, but not if the conflict is motivated by greed, as in the chicken game. In a study by Pinter et al., (2007), the leader's communications with the constituency should generate support for the leader's selfish or competitive behaviour.

Our experiments combine some of the above factors in a study of decision-making and the behaviour of group representatives in economic games. To the best of our knowledge, we are the first to study negotiations by group representatives in economic experiments.

In our experiments, the negotiating subjects were representatives of three-person groups. Before negotiations began, we allowed them to chat with their group members using a messaging program. This manipulation had several intentions. First, we wanted to make the fact of being a group-representative as salient as possible. Second, we wanted to enhance group identification. Finally, in several treatments, we allowed participants to discuss their strategies with the group at several points during the experiment to enhance accountability and to see what strategies the groups would select and how the representative would behave based on this discussion. The subjects always knew that a randomly chosen representative of their group would play a game with other representatives, but they never knew in advance who would be the representative. Our treatments varied in terms of knowledge of the instructions available at the time of the first chat and in the strength of the accountability manipulation. The negotiation exercise was a public goods game played by three subjects (representatives of three different groups). We compare the contribution levels of the representatives in the different games. We also compare these contribution levels to a standard three-person public goods game using the same parameters.

Public goods games model conflicting interactions, i.e., situations where the partial profits of different agents are in conflict with each other and/or with the profits of a larger entity. The structure of a public goods game is such that the more each participant contributes to the public good, the larger the gain for all participants. However, it is in each participant's interest to take a free ride on the efforts of the others. Extensive literature on public goods games exists in economics, psychology, and political science. All three fields use game theory as a theoretical basis (for an overview of the related literature in experimental economics, see Ledyard, 1995). Most studies of public goods games have examined the interactions of individuals.

With this background, the main research questions are as follows:

- Is there a general difference between a decision made as an individual and one made as a representative of a group who is accountable to the group members in a social dilemma game?
- What is the basis of this difference? The reasons might be feelings of belonging or group identification, but also the general norms of a group/society and the pressure to follow them (by being held accountable by the members of their in-group).

The first of these questions can be answered by our behavioural results, comparing the behaviour of individuals playing a public goods game to that of group representatives playing essentially the same public goods game with varying levels of accountability. Our results show that, indeed, behaviour does matter, whether one is playing as an individual or as a group representative. The second question can be answered, at least tentatively, using the chats from the pre-play communication. Our data suggest that an important role is played by the effect described by De Cremer and Bakker (2003): the representatives become aware of the cooperative preferences of their constituency.

We ran experiments in Japan and Spain to further test for cultural differences between individualistic Western and collectivistic Asian cultures (e.g., Triandis, 1995). We found no highly significant differences in behaviour between our Spanish and Japanese subjects. This might be related to the fact that Spain is a Western country that ranks high on Hofstede's (1980) collectivist dimension, just as Japan does. We do, however, find some differences in the strengths of the effects and related differences in the chat content that also underscore our more general results.

The remainder of the paper is organized as follows: Section two describes the experiment, section three reports the results, and section four concludes with a discussion.

II. The Experiments

Basic design

We used a standard public good game as the basic tool for our experiment. The experiment was programmed and conducted with z-Tree software (Fischbacher 2007). Based on our research questions, we used one Baseline treatment and three “representative” treatments that differed in terms of the informational structure and the number of interactions between the subjects of one group.

The Baseline treatment is a simple three-person public good game of ten periods. Subjects have five tokens in each period that they can distribute between a personal and a public account. One token in the personal account pays one token for oneself, while one token in the public account pays 0.75 tokens for each subject playing, including oneself. The payoff to individual i , U_i , is derived from the following function.

$$U_i = (E_i - g_i) + 0.75 \sum_{i=1}^3 g_i$$

where E_i is the initial endowment and g_i is a voluntary contribution to the group project. The dominant strategy of such a game is to make no contribution to the public good even though the subjects would be best off if everybody contributed all of their tokens to the public good.

In our public goods game experiment, the subjects received feedback after each round on the total contribution of the others, but not on the individual contributions of each other member of the group.

The same basic public goods game was used in all treatments. The representative treatments differed in one main respect from the Baseline treatment: representatives of three-person teams played the game. Therefore, we have three groups of three people, each involved in one public goods game, but out of each group, only one person is playing the public goods game. Contributions to the public goods game have an effect on all nine subjects within one public goods game. Earnings made by the representatives are equally distributed among all of the subjects of one group, both those playing (the representatives) and those not playing.

In all of the representative treatments, the three-person teams were allowed to talk to each other for five minutes using a chat program before the public goods game began. The representative treatments differed with respect to the information available for the chat as well as with respect to repeated chat possibilities and knowledge thereof. The three representative treatments differed in the following ways:

In treatment R1, subjects were allowed to chat for five minutes with their in-group before reading the instructions for the public goods game. This should enhance their identification with their in-group and make the fact of being a group representative more salient for them.

In treatment R2, the subjects received the public good game instructions before chatting for five minutes with their in-group members. The subjects were

instructed to discuss their strategies during the chat time. As an additional change, after the first 10 rounds of the game, they received a second and unexpected chance to chat with their in-group members, which allowed us to observe their reactions to the results of the game.

Treatment R3 was essentially the same as treatment R2, with the exception that the subjects knew from the beginning that there would be a second chat with their in-group after 10 rounds of game play. We introduced the second chat to enhance accountability. The representatives now knew that they would have to justify their actions in front of their group members.

Procedure

When the subjects arrived at the laboratory, they were randomly seated at computers that were separated by partitions so that others could not view them. The subjects were organised randomly into three-person groups and, in the representative treatments, larger entities comprising three such groups to play the public goods game together.

Depending on the treatment, the small groups were allowed to chat for five minutes about everything except identifying information (R1) or they received instructions for the public goods game, which were also read out aloud (R2 and R3). In treatments R2 and R3, the groups were then asked to chat for 5 minutes about the strategy to follow, but the subjects in R1 were not asked to chat. The subjects in the Baseline treatment were not allowed to chat, but immediately received instructions for the public goods game. After the subjects had read the instructions, they took a brief test at their computer terminals to verify that they correctly understood the rules of the game. The experiment did not start until all of the subjects had answered the questions correctly. After subjects had read the instructions and the chats were finished, in the representative treatments, the computer selected at random a representative for each group. Therefore, the subjects did not know who would be the representative when they had their in-group chat.

In all of the treatments, the subjects played 10 rounds of the public goods game described above. In the Baseline treatment, the experiment ended when this game was finished and subjects were privately paid a show-up fee plus their earnings from the experiment. In the representative treatments, the experiment continued. Either a new representative was selected (R1) or the groups were allowed to again chat for 5 minutes, after which a new representative was selected (R2 and R3). The game was then played for another 10 rounds,¹ after which the representatives

¹ The data for the second 10 periods are not analyzed in this paper. The second 10 periods are dependent on what happened in the first 10 periods, and such an analysis is not relevant to the research questions dealt with in this paper. This will be done in a later paper (Iida and Schwieren, in progress).

completed a questionnaire asking about their identification with their in-group (R1, R2, and R3) and sense of accountability (R2 and R3 only). The subjects were then paid and dismissed. Table 1 summarizes the Baseline and representative treatments.

Table 1: Treatments

	Baseline	R1	R2	R3
Representatives?	No	Yes, 2	Yes, 1	Yes, 1
Chat before playing?	No	Yes	Yes	Yes
Instructions known before chat?		No	Yes	Yes
Chat after playing?	No	No	Yes, unknown before	Yes, known before

Sample

We conducted the Spanish sessions at the Universitat Pompeu Fabra in Barcelona. The participants were students of various faculties of this university. Each treatment comprised 12 groups, so data is available for 12 players in each treatment. However, in the representative treatments, three representatives always played together, so truly independent data is available only for 4 groups (representatives) (after period 1, when the behaviour was still independent). The show-up fee in Spain was €3. In addition to the show-up fee, the subjects received a performance-based amount. Each token that the subjects earned in the experiment was worth 0.02€ (see instructions in the appendix).

In Japan, the experiments were conducted in the experimental laboratory at Kyoto Sangyo University. The participants were students from all of the school's faculties. 27, 54, 81 and 72 subjects participated in the Baseline, R1, R2, R3 treatments, respectively. Thus, truly independent data is available for 9 groups in the Baseline treatment and for 6 groups in R1, 9 groups in R2, and 8 groups in R3. Each token earned by the subjects in the experiment was worth 3 Yen, which is approximately equivalent to the Spanish payoff. The show-up fee was 500 yen (about €3.1).

III. Results:

Differences between treatments

The behaviours of the representatives from Japan and Spain are compared using non-parametric Man-Whitney U-tests. Surprisingly, the two countries show no significant differences in the contributions to the public good in any of the treatments using all of the data. However, a difference in the strength of the differences between the treatments was found. The treatment effects were generally strong and significant

in Spain, but not in Japan. Furthermore, if only period 1 data is considered, a marginally significant difference can be seen in the Spanish and Japanese data for R3.

Table 2 Differences between countries: overall

	Jpn	Spn	p	z
Baseline	2.14	1.91	0.5553	-0.59
R1	1.76	1.59	0.4225	-0.802
R2	2.03	1.92	0.7573	-0.309
R3	2.31	2.37	0.6706	-0.425

Table 3: Differences between countries: 1st period

	Jpn	Spn	p	z
Baseline	2.59	2.83	0.5068	-0.664
R1	2.33	1.83	0.2173	-1.234
R2	2.44	2.58	0.6248	-0.489
R3	2.38	3.58	0.0748	-1.782

Due to these differences between the two countries, the data for Japan and Spain were analyzed separately.² Possible reasons for the differences will be discussed later in this paper.

The following discussion considers only the first-period data for the statistical analysis, as the data for later periods is dependent on the first-period data. The development over all periods will be described later in this paper.

Spain

Using a Kruskal-Wallis test to look for a general treatment effect, we found a significant difference in the first-period contributions across all treatments (Chi-Square = 11.41, $p = 0.0097$). We then looked at pairwise comparisons of the treatments using non-parametric Man-Whitney U-tests. A comparison of the baseline and R1 treatments revealed a significant difference between the two treatments, with lower contributions in the R1 treatment. Group representatives that could not discuss the strategy of the game with their constituency played the public goods game more selfishly than did individuals. This difference no longer holds when the R2 and Baseline treatments are compared. Representatives of groups who discussed their strategy before taking an action cooperated as much as individuals did.

R3 did not significantly differ from the Baseline treatment. Contributions in the R3 treatment were even slightly higher than in the Baseline treatment. Enhancing

² The pooled data for Spain and Japan shows the intermediate results for both countries. No significant differences are seen among all of the treatments ($p = 0.19$, K-W test) and the p value indicates that the differences are smaller than that of the Spanish data but larger than that of the Japanese data. The M-W test between each treatment found a single marginally significant difference ($p = 0.0571$) between R1 and R3. Table ** in appendix shows all of the results.

the possibilities of discussion with the group seems to encourage the representatives to act even slightly more cooperative than individuals in a public goods game.

Table 4: Differences between treatments in Spain: 1st period

	Average	R1		R2		R3	
		p	z	p	z	p	z
Baseline	2.83	0.0592	-1.887	0.6501	-0.454	0.1937	-1.3
R1	1.83	-	-	0.2601	-1.126	0.0055	-2.773
R2	2.58	-	-	-	-	0.1787	-1.345
R3	3.58	-	-	-	-	-	-

If we compare the different representative treatments, the difference between R1 and R3 is significant. Representatives of groups that had several possibilities to discuss their strategy (before and after playing the public goods game) were much more cooperative in a public goods game than representatives that could not discuss their strategies with their groups.

The differences among the other representative-treatments were not significant.

Japan

The same tendency is seen in the Japanese data. The R1 treatment has the lowest average, lower than that of the Baseline, while the R3 treatment has the highest average, higher than that of the Baseline, at least for the overall data. The Japanese data shows no significant differences in either the Kruskal-Wallis tests or the pairwise comparisons (table 5).

Table 5: Differences among treatments in Japan: 1st period, Man-Whitney-U tests

	Average	R1		R2		R3	
		p	z	p	z	p	z
Baseline	2.59	0.458	-0.743	0.805	-0.247	0.707	-0.376
R1	2.33	-	-	0.916	-0.105	0.933	-0.084
R2	2.44	-	-	-	-	0.885	-0.144
R3	2.38	-	-	-	-	-	-

Figures 1 and 2 show the average number of tokens that were contributed to the public good over all periods in each country. The contribution levels in each treatment were similar in both countries. The contributions of the R3 subjects over 10 periods were the highest (2.31 in Japan and 2.37 in Spain), while those of the R1 subjects were the lowest (1.76 in Japan and 1.59 in Spain). The contributions of the Baseline and R2 subjects were similar (2.14 and 2.03 in Japan and 1.91 and 1.92 in Spain). They were higher than those of the R1 subjects but lower than those of the R3 subjects.

Relationships between contribution decisions and questionnaires

In addition to collecting data on the contributions to the public goods game, we collected questionnaire data on identification with the in-group (R1-R3) and perceived accountability (R2 and R3 only) after the subjects had made their contribution decisions. The questions are the same as those used in psychological research on identification (Mullin and Hogg, 1998) and accountability (Hochwarter, Kacmar, and Ferris, 2003). They are usually relatively highly reliable. For the subjects in Spain, Cronbach's alpha was .90 for the identification scale and .63 for the accountability scale. For the Japanese subjects, the alpha was .88 for the identification scale and .80 for the accountability scale. With the exception of the reliability of the accountability scale in Spain, the alphas are all reasonably high. Therefore, this questionnaire data can be used for the analyses.

Spain

For all of the treatments, identification with the in-group correlates highly significantly with the contributions. In other words, the subjects who strongly identified with their in-group contributed more to the public good ($r = .340$, $p = .028$). Higher accountability is also positively related to contributions, but this correlation is not significant (contributions $r = .137$, $p = .522$).

Accountability and identification are equal among the treatments. T-tests were used for the parametric data.

Japan

Among all of the treatments, neither identification with the in-group nor accountability correlated significantly with contributions (identification: $r = 1.02$, $p = .402$, accountability $r = -.018$, $p = .899$). T-tests show a difference in identification among the treatments: In R3, identification was significantly higher than in R1 and R2 (R1-R3 $t = -2.525$, $p = .009$, R2-R3 $t = -1.835$, $p = .073$).

Analysis of the chat data from the first chat³

The chat data was descriptively analyzed to see if the differences in our treatments and between the two countries could be explained. The chat data may provide clues about why the treatments in Japan showed smaller differences than those in Spain.

The chat data was analyzed using a very basic categorization scheme. First, the data from each discussion was categorized in terms of whether or not the subjects

³ The second chat is not analyzed in this paper, as it is not necessary for answering the research questions posed here. This will be done in another paper (Iida and Schwierien, in progress).

discussed a playing strategy. A strategy discussion is one in which some reference is made to “what to do in the game.” This implies that, even in the R1 treatment, in which the subjects did not know the exact rules of the game, they could have discussed strategy, if only in very general terms.

Second, the data is categorized in terms of whether or not the group reached agreement about a specific strategy to follow. Again, the analysis is very simple: if, at the end of a discussion, each subject says, “ok, I agree” or something similar, it is categorized as “agreement.” If the discussion continues or is stopped without such an explicit agreement, it is categorized as “no agreement.”

Finally, the primary strategy that is discussed or agreed upon is categorized as cooperative, non-cooperative, or “no clear opinion” (if many suggestions are made but no agreement is reached). A strategy was cooperative if the subjects planned to cooperate and then react to what the others did, but was non-cooperative if the subjects planned to free-ride and then react to what the others did, even becoming cooperative if the others cooperated.

Because these were simple and clear categories, we did not do the categorization ourselves, but used hypothesis-blind raters.

Our first category already revealed a striking difference between the Japanese and Spanish subjects. In the R1-treatment, where the specific rules of the game were not initially known, 50% of the Spanish subjects discussed some form of strategy, while none of the Japanese subjects did. None of the subjects had been given instructions, so they could not discuss the details of any strategy, but the Spanish chat protocols contained comments such as “whether or not it’s about cooperation, let’s cooperate, ok?” Therefore, applying the other two categories to the Spanish data, one-third of the R1 groups showed agreement on a general strategy.

In the R2 treatment, both the Japanese and Spanish subjects discussed strategy because they were explicitly requested to do so. Still, the Japanese and Spanish subjects again differed in the same way. While 100% of the Spanish subjects discussed a strategy, only 59.3% of the Japanese subjects did. Of those who discussed a strategy, 41.7% of the Spanish subjects, but only 6.25% of the Japanese subjects, came to an agreement within 5 minutes of the start of chatting. Therefore, in terms of the results of the discussion, the two countries show a smaller difference, which might explain why the two countries are similar in behaviour but different in terms of the degree of the difference.

In the R3 treatment, 100% of the Spanish subjects and 62.5% of the Japanese subjects discussed strategy. 58.3% of the Spanish groups and 20% of the Japanese groups reached agreement on a specific strategy.

In all of the treatments, of those who did discuss a strategy, 53.33% of those in Spain but only 29.03% of those in Japan tended to cooperate. The latter, however, is

not because more of the Japanese subjects tended to free-ride (13.33% in Spain vs. 6.45% in Japan), but because to a larger extent, the Japanese subjects showed no clear tendency (33.33% in Spain vs. 64.52% in Japan). Of those groups that reached agreement, 75% in Japan and 87.5% in Spain voted for a cooperative strategy (25% (one group) in Japan agreed on disagreement) about the strategy.

How can we relate this to our behavioural results?

First, as has been said before, the focus on discussing and agreeing upon a strategy is much stronger in Spain than in Japan. The difference between Japan and Spain in terms of discussing strategy and reaching an agreement is highly significant (Chi-Square tests: for discussion of strategy, Chi-Square = 12.834, $p = .000$; for agreement, Chi-Square = 12.800, $p = .000$). This could explain the generally smaller difference in Japan.

Second, if the subjects discussed a strategy, they generally tended to focus on cooperative strategies, especially in the R2 and R3 treatments⁴. This was true in both Japan and Spain. Also, in both countries, the contributions in the first period were significantly higher when strategy had been discussed ($t = -3.055$, $p = .003$) and marginally significantly higher when agreement had been reached ($t = -1.641$, $p = .106$).

Discussion

This study focused on answering two questions: First, is there a general difference in a decision made as an individual and a decision made as a group representative in a social dilemma game, as some psychology literature indicates? Second, what is the basis of this difference? More precisely, the study examined the effect of in-group identification and social norm compliance regarding this difference.

The basic hypothesis—being a group representative has an effect—was confirmed, but the effect is not simple. In this study, the subjects acting as group representatives contributed less than the individual subjects (Baseline) when they are not given an opportunity to discuss their strategy with their constituency. However, when they were given an opportunity to discuss their strategy, they contributed nearly the same amount as in the Baseline treatment. Furthermore, when they had a chance to discuss the strategy before and after making a decision, they contributed even more than did those in the Baseline treatment. The moderating factors were a sense of accountability and identification with the in-group, which had, at least in Spain, a

⁴ In R1, the majority of the groups didn't discuss strategy, and only one-third of those who did were able to come to an agreement. Those who did discuss strategy and come to an agreement tended to cooperate, but as the game was not known, this is less clear and the level of commitment was probably much lower.

small positive effect on contributions. Furthermore, contributions were higher when the groups agreed on a strategy.

These findings seem to be partially at odds with the results reported by Pinter et al., (2007), who found that accountable leaders were less cooperative, while unaccountable leaders were as cooperative as individuals. A closer look at their findings, however, shows that their model can explain our results. Pinter et al., (2007), listed five possible reasons why group decisions are usually more competitive than individual decisions.

- *The social-support-for-shared-self-interest hypothesis* assumes that groups can provide social support for selfish-competitive behaviour against an out-group.
- *Schema-based distrust or fear* is the hypothesis that groups are expected to be competitive towards other groups and therefore trust is lower in inter-group contact than in inter-individual contact.
- *The identifiability hypothesis* states that people as group members have a certain level of anonymity that allows them to act more selfishly.
- *The in-group favouring norm hypothesis* is based on the idea that group membership implies a normative pressure to act in the interests of the in-group.
- *The altruistic rationalization hypothesis* suggests that inter-group contexts allow people to rationalize selfish behaviour as being altruistic for the group.

In their study, group leaders acted more competitively than individuals, but only when they were accountable. In their experiment, accountable leaders believed that their in-group members would learn about their behaviour, while non-accountable leaders knew that in-group members would not learn of the leader's decisions even after the experiment. In this study, the leaders and group members did not communicate. In their first study, communication was not "democratic" in the sense that the members of the leader's group were only supposed to make comments and it was clear that the leader would decide. Moreover, the leaders of the groups that together played the PD game also communicated.

As noted earlier, Pinter et al., (2007), did find accountable leaders to be more competitive, in contrast to our "most accountable" (R3) representatives, which were more cooperative than the individuals.

An important point in our experiments, however, allows us to explain our results in terms of their model: In our basic representative treatment, we replicated the findings of Pinter et al., i.e., representatives are more competitive than individuals. In our understanding of accountability, our R1 treatment was the least accountable. Looking at the main accountability manipulation of Pinter et al., however, shows that, in their terms, our R1 representatives were highly accountable, as they and their in-group members knew that everybody would learn of their actions and that the

payments to all of the group members depended on those actions. Therefore, the representatives acted in the same way as those in the study by Pinter et al., i.e., they assumed that the group morality, as Pinter et al. called it, is the salient norm and behave selfishly. If, however, the representatives in our R2 and R3 treatments learned that the in-group had achieved a consensus that cooperation is the right behaviour, then the representatives behaved less selfishly than did the individuals because they were following the “norm” established by their groups. Our chat data shows social support for cooperative strategy, not a competitive strategy. Even though we found some evidence for distrust of the out-group in our chat data, the fact that the game was played over multiple periods usually allowed the groups to agree upon at least cooperative attempts in the first rounds. Unfortunately, Pinter et al., do not report exactly what was discussed during the chat stage, but they do report that the representatives who were not allowed to chat believed that their in-groups favoured a competitive strategy and were just as likely as our R1 representatives to believe so.

Therefore, our results with respect to the comparison of the Baseline treatment with R1 and R2 can be explained in terms of the model used by Pinter et al., (2007).

Still open to explain is why the representatives in R3 became even more cooperative than the individuals. Compliance with group norms might have played a role here, too. As we hypothesized, having a second chat after the game has been played might enhance feelings of accountability or the need to comply with in-group norms. As the in-group norms in our case seem to be rather cooperative, however, it is only logical for the representatives to act more cooperatively when the pressure to follow group norms increases. Furthermore, in R3 we had even more agreements upon strategy, and most groups agreed upon a cooperative strategy.

A focus on agreement upon a strategy and its consequences can also explain why the effects in our treatments were weaker in Japan, as far fewer groups in Japan discussed strategy and even fewer groups reached agreement. In this case, the representatives could act like individuals, as they knew that, even if they wanted to do, they could not comply with an in-group norm, as there was no clear normative statement by their in-group. Therefore, they could only decide as individuals, perhaps influenced by societal norms on proper decision-making in such a situation. Buchan et al. (2003) and Heine and Lehman (1997) showed that in-group bias and out-group distrust based on arbitrary categorizations was weaker in Asia than in North America. This might be one reason why the Japanese representatives in the R1 treatment were not much less cooperative than the individual negotiators. A report on low generalized trust by Yamagishi and Yamagishi (1994) seems to contradict that, but, our subjects were all students of the same university, and that joint categorization might have overridden the artificial in-group/out-group categorization that worked so well in Spain.

Our Japanese results contrast with those reported by Takemura and Yuki (2007), who replicated the inter-individual/inter-group discontinuity experiments conducted by Insko et al., (e.g., 1990, 1994), in Japan. They found discontinuity in the fact that groups are more competitive than individuals. In their experiment, however, the groups were required to reach a consensus, which they also always did – within 15 seconds. This is in sharp contrast to our results, which show that the Japanese groups seldom reached an agreement within 5 minutes. It isn't surprising that the Japanese subjects of our experiment, in which they were not requested to reach a consensus, weren't keen to discuss their strategy. Many Japanese people hesitate to give their opinion and rather evade a serious discussion unless they are required to do so.⁵ The request from the experimenter to reach a consensus in Takemura and Yuki (2007) made subjects feel responsible and exerted strong pressure on them to overcome that hesitation. Because subjects of our experiment rarely reach a collective decision, the decisions of the representatives are mainly based on their individual thoughts. This is the reason why the differences between the decisions of the representatives and individuals are not that large.

To summarize, we can now answer our two research questions: Being a group representative does influence decision-making in a social dilemma game. When the representatives cannot discuss their behaviour with their constituency, they make decisions based on general group-norms. At least in our Spanish sample, they assume that competitiveness is the appropriate behaviour. This might stem from the fact that people in general seem to believe that inter-group relationships are more competitive than inter-individual relationships and they experience more competitive inter-group interactions than inter-individual interactions (Hoyle et al., 1989, Pemberton et al., 1996). If representatives come to an agreement about their strategy with their in-group, they closely follow the norms set by their group members. The more they identify with their in-group, the more they feel accountable for their decisions. These results indicate that negotiations by representatives do differ from negotiations by individuals, and that representatives in general follow the norms set by their constituencies. In inter-group contexts, the representatives seem to believe that inter-group contexts are competitive. This is in line with the general assumptions held by western societies (but not by Japan). If consultations with their in-groups do not confirm this assumption, they might behave even more cooperatively than individuals do, even more so if they have a very strong commitment to their group.

Our experiments provided a very limited context for negotiations by

⁵ As members of a collectivist culture, Japanese wish to maintain harmony between group members, keep disagreements covert, and allow all members to save face. For that reason, to achieve a collective decision, a practice called *nemawashi* is common in Japan. *Nemawashi* is an informal, separate discussion with each individual involved in a decision to resolve objections before a proposal is formally discussed in a meeting. (March, 1990).

representatives, a context that deviates in many ways from real-world situations. First, our representatives were randomly assigned and didn't know that they are going to be representatives when they discussed strategy with their groups. Second, negotiating badly for their group had no further negative consequences for them in terms of re-election or something similar. Future research should extend the experimental paradigm towards situations in which representatives can be held accountable in ways stronger than just "cheap talk" and observation, and representatives should be selected by their groups. Furthermore, to better understand the differences seen between Japanese and Spanish subjects, the experiment should be replicated in a truly individualistic country – even though recent research has shed doubts on this categorization by showing that Northern Americans do not differ much from Asians in terms of group orientations (Oyserman et al., 2002, Buchan et al., 2003, Takemura and Yuki, 2007). It would be necessary to very carefully select the country in which to run the experiment and the situations in which to place the subjects in terms of in-group/out-group categorizations and prevailing societal norms for behaviour in social dilemma situations.

From this first attempt to systematically study differences in decision-making and negotiation behaviour between group representatives and individuals, we can conclude that there are, indeed, important differences unlike those in the behaviours of interacting groups and individuals. As negotiations by representatives are very common, further research should be conducted to better understand the determinants of behaviour in such situations.

References

- Andreoni, J. 1995. "Warm-Glow Versus Cold-Prickle: The Effects of Positive and Negative Framing on Cooperation in Experiments." *The Quarterly Journal of Economics*, 110:1-21.
- Barry, Bruce, Ingrid Smithey Fulmer and Gerben A. Van Kleef. 2004. "I Laughed, I Cried, I Settled. The Role of Emotion in Negotiation." In *The Handbook of Negotiation and Culture*, ed. Michele J. Gelfand, and Jeanne M. Brett, 71-94. Stanford, California: Stanford University Press.
- Bornstein, Gary and Meyrav Ben-Yossef. 1994. "Cooperation in inter-group and single-group social dilemmas." *Journal of Experimental Social Psychology*, 30: 52-67.
- Bornstein, Gary, Danny Mingelgrin, and Christel Rutte. 1996. "The Effects of Within-Group Communication on Group Decision and Individual Choice in the Assurance and Chicken Team Games." *Journal of Conflict Resolution*, 40 (3): 486-501.

- Bornstein, Gary and Ilan Yaniv. 1998. "Individual and Group Behavior in the Ultimatum Game: Are Groups More "Rational" Players?" *Experimental Economics*, 1: 101-108.
- Bornstein, Gary, and Zohar Gilula. 2003. "Between-Group Communication and Conflict Resolution in Assurance and Chicken Games." *Journal of Conflict Resolution*, 47 (3): 326-339.
- Bornstein, Gary. 2003. "Inter-group Conflict: Individual, Group, and Collective Interests." *Personality and Social Psychology Review*, 7(2):129-145.
- Bornstein, Gary, Tamar Kugler and Anthony Ziegelmeyer. 2004. "Individual and group decisions in the centipede game: Are groups more "rational" players?" *Journal of Experimental Social Psychology*, 40:599-605.
- Brett, Jeanne M. and Shirli Kopelman. 2004. "Cross-Cultural Perspectives on Cooperation in Social Dilemmas." In *The Handbook of Negotiation and Culture*, ed. Michele J. Gelfand and Jeanne M. Brett, 395 – 411. Stanford, California: Stanford University Press.
- Buchan, Nancy R., Rachel T.A. Croson and Eric J. Johnson. 2003. "Let's get personal: An international examination of the influence of communication, culture and social distance on trust and trustworthiness." University of Wisconsin, Madison Working paper.
- Cason, Timothy N., Tatsuyoshi Saijo and Takehiko Yamato. 2002. "Voluntary Participation and Spite in Public Good Provision Experiments: An International Comparison." *Experimental Economics*, 5:133 – 153.
- Elster, Jon. 1989. "Social Norms and Economic Theory." *Journal of Economic Perspectives*, 3 (4): 99-117.
- Fehr, Ernst and Urs Fischbacher. 2004. "Social norms and human cooperation." *Trends in Cognitive Science*, 8(4): 185-190.
- Heine, Steven J., and Darrin R. Lehman. 1997. "The cultural construction of self-enhancement: An examination of group-serving biases." *Journal of Personality and Social Psychology*, 72: 1268-1283.
- Hochwarter, Wayne. A., C. J. Kacmar, and G. R. Ferris. 2003. "Accountability at work: An examination of antecedents and consequences." Paper presented at the annual meeting of the Society of Industrial and Organizational Psychology, Orlando, FL.
- Hogg, Michael A. 1992. *The social psychology of group cohesiveness: From attraction to social identity*. New York: New York University Press.
- Hofstede, Geert. 1980. *Culture's consequences: International differences in work-related values*. Beverly Hills, CA: Sage.

- Hoyle, Rick H., Robin L. Pinkley, and Chester A. Insko. 1989. "Perceptions of social behavior: Evidence of differing expectations for interpersonal and inter-group interaction." *Personality and Social Psychology Bulletin*, 15(3): 365-376.
- Insko, Chester A., John Schopler, Kenneth A. Graetz, Stephen M. Drigotas, David P. Currey, Shannon L. Smith, et al. 1994. "Inter-individual-inter-group discontinuity in the prisoner's dilemma game." *Journal of Conflict Resolution*, 38: 87-116.
- Insko, Chester A., John Schopler, Rick H. Hoyle, Gregory J. Dardis and Kenneth A. Graetz. 1990. "Individual-group discontinuity as a function of fear and greed." *Journal of Personality and Social Psychology*, 58(1): 68-79.
- Kugler, Tamar, Martin G. Kocher, Matthias Sutter and Gary Bornstein. 2007. "Trust between individuals and groups: Groups are less trusting than individuals but just as trustworthy." *Journal of Economic Psychology*, 28(6):646-657.
- Kumar, C. Rallapalli. 2004. "Culture and Emotions in Intercultural Negotiations. An Overview." In *The Handbook of Negotiation and Culture*, ed. Michele J. Gelfand, and Jeanne M. Brett, 95 – 113. Stanford, California: Stanford University Press.
- Lang, Peter J. 1980. "Behavioral treatment and bio-behavioral assessment: Computer applications." In *Technology in mental health care delivery systems*. eds. Joseph B. Sidowski, James H. Johnson and Thomas A. Williams, 119-167, Norwood, NY: Ablex.
- Ledyard, John O. 1995. "Public Goods: A Survey of Experimental Research." In *The Handbook of Experimental Economics*. ed. John. H. Kagel and Alvin. E. Roth, 111-181, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Lesbirel, S. Hayden. 1998. *NIMBY Politics in Japan*. Cornell University Press, Ithaca and London.
- Lodewijkx, Hein F. M. and Jacob M. Rabbie. 1992. "Group-centered and self-centered behaviour in inter-group relations." *International Journal of Psychology*, 27: 3-4.
- Loewenstein, George, Elke U. Weber and Christopher K. Hsee. 2001. "Risk as Feelings." *Psychological Bulletin*, 127: 267–286.
- Luhan, Wolfgang J., Martin G. Kocher and Matthias Sutter. Forthcoming "Group polarization in the team dictator game reconsidered." *Experimental Economics*.
- March, Robert. M. 1990. *The Japanese negotiator: Subtlety and strategy beyond Western logic*, Tokyo: Kandansha International.
- Markus, Hazel Rose and Shinobu Kitayama. 1991. "Culture and the self: Implications for cognition, emotion, motivation." *Psychological Review*, 98: 224-253.
- Mullin, Barbara-Ann and Michael A Hogg. 1998. "Dimensions of subjective uncertainty in social identification and minimal inter-group discrimination." *British Journal of Social Psychology*, 37: 345-365.

- Oyserman, Daphna, Heather M. Coon, and Markus Kimmelmeier. 2002. "Rethinking individualism and collectivism: Evaluation of theoretical assumptions and meta-analyses." *Psychological Bulletin*, 128: 3-72.
- Fischbacher, Urs. 2007 "z-Tree: Zurich Toolbox for Ready-made Economic Experiments." *Experimental Economics*, 10(2): 171-178.
- Pemberton, Michael B., Chester A. Insko, and John Schopler. 1996. "Memory for and experience of differential competitive behavior of individuals and groups." *Journal of Personality and Social Psychology*, 71: 953-966.
- Pinter, Brad, Chester A. Insko, Tim Wildschut and Jeffrey L. Kirchner. 2007. "Reduction of Inter-individual-Inter-group Discontinuity: The Role of Leader Accountability and Proneness to Guilt." *Journal of Personality and Social Psychology*, 93: 250-265.
- Pruitt, Dean G. and Peter J. Carnevale. 1993. *Negotiation in social conflict*. Berkshire: Open University Press.
- Schwieren, Christiane. 2003. "The gender wage gap – due to differences in efficiency wage effects or discrimination?" METEOR research memorandum RM03028, Universiteit Maastricht.
- Smith, Vernon L. 2003. "Constructivist and Ecological Rationality in Economics." *American Economic Review*, 93(3): 465-508.
- Sugiman, Toshio. 1998. "Group dynamics in Japan." *Asian Journal of Social Psychology*, 1: 51-74.
- Takemura, Kosuke and Masaki Yuki. 2007. "Are Japanese Groups More Competitive than Japanese Individuals? A Cross-Cultural Validation of the Inter-individual-Inter-group Discontinuity Effect." *International Journal of Psychology*, 42: 27-35.
- Cason, Timothy N. and Vai-Lam Mui. 1997. "A Laboratory Study in Group Polarisation in the Team Dictator Game." *The Economic Journal*, 107(444): 1465-1483.
- Triandis, Harry C. 1995. *Individualism and collectivism*. Boulder: Westview Press.
- Turner, John. C. and Penelope J. Oakes. 1986. "The Significance of the Social Identity Concept for Social Psychology with Reference to Individualism, Interactionism and Social Influence." *British Journal of Social Psychology*, 25: 237-252.
- Wildschut, Tim, Hein F. M. Lodewijckx and Chester A. Insko. 2001. "Toward a Reconciliation of Diverging Perspectives in Inter-individual-Inter-group Discontinuity: The Role of Procedural Interdependence." *Journal of Experimental Social Psychology*, 37: 273-285.
- Yamagishi, Toshio, and Midori Yamagishi. 1994. "Trust and Commitment in the United States and Japan." *Motivation and Emotion*, 18: 9-66.

Graphs

Figure 1: Average Contributions in Spain

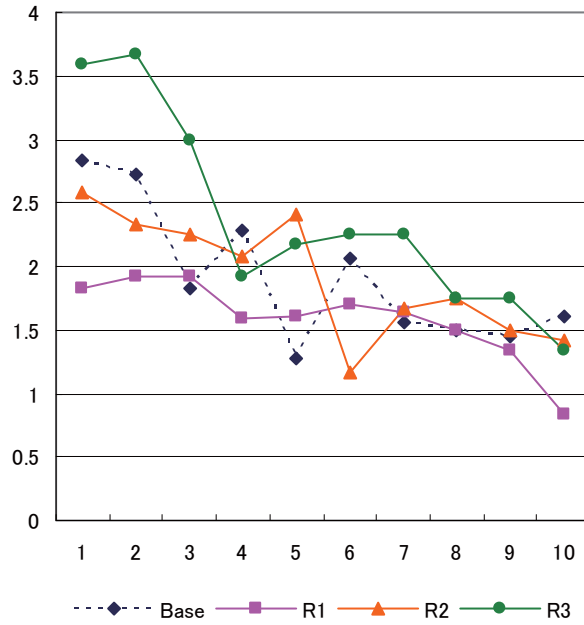
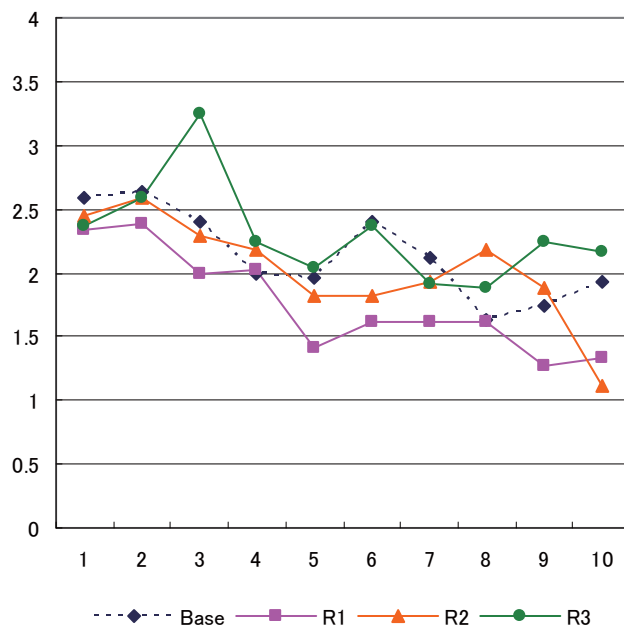


Figure 2: Average Contributions in Japan



Appendix I - Instructions

Dear Participant,

Thank you for participating in this experiment in decision-making.

INSTRUCTIONS

This is an experiment in decision-making. You will be paid for your participation. The amount of money you earn will depend on the decisions made by you and the other decision-makers.

At no point in the experiment will you be asked to reveal your identity to anyone. Your name will never be associated with your decisions. To keep your decisions confidential, please do not reveal them to any of the other participants.

At this moment, we will give you 3 euros (*500 Yen in Japan) for being on time. All of the money that you earn from now on will be yours, and your earnings will be paid to you in cash at the end of today's experiment.

THIS EXPERIMENT

In this experiment, you will be in a group of three people. In the first stage of the experiment, you will have time to meet the members of your group and talk to them via a messenger program for five minutes. In the computer screen you will see soon, you can type any question or comment that you would like to make to the other members of your group.

In the second stage of the experiment, a representative from your group will play an interactive game with representatives from the other groups in the experiment. You may or may not be chosen to represent your group. If you have been chosen to represent your group will be shown to you on the screen. Before the first stage starts, you will be given the instructions for the game in the second stage.

(In the last stage of the experiment, you will again meet the members via Messenger for five minutes.) *This is used only in the R3 treatment

Some general advice before the experiment begins:

If you have any questions during the experiment, please raise your hand and wait until the experimenter comes to your table.

Do not communicate with any of the other participants except when the experimenter asks you to do so.

Payment will be based on your performance during the experiment. It will be paid to you privately and in cash after the experiment has concluded.

Do you have any questions?

(Move to the instructions for the second part)

INSTRUCTIONS FOR THE SECOND PART

During the second part, a representative from your group interacts with representatives from the other groups in the room. The screen will indicate whether or not you have been randomly selected to represent your group.

If you have been selected to represent your group, you will interact later with representatives from the other groups.

If you have not been selected to represent your group, you will be asked to complete a short questionnaire.

The representatives will play 10 rounds. Only after these 10 rounds have been completed will you be told the outcome of their play.

New representatives will then be selected to play another 10 rounds following the same rules.

You and your group members will receive payments based on the decisions taken by the representatives of the groups during the experiment.

INSTRUCTIONS FOR REPRESENTATIVES

You have been selected to represent your group. You will now interact with representatives from the other two groups in the laboratory.

You and your group members will receive payments based on the decisions you make in your interaction with the other representatives. You will interact for 10 rounds and make 10 decisions. The structure of the interaction is as follows:

You will be asked to make a series of decisions about how to allocate a set of tokens. You interact with the representatives of the other two groups in this lab. You will not be told the identities of the others with whom you will interact.

For each decision, you will have 5 tokens to allocate. You must decide how many of these tokens you wish to invest in project A and how many you wish to invest in project B. The amount of money you earn depends on how many tokens you invest in project A, how many you invest in project B, and on how many the other representatives invest in project B.

EXAMPLE OF DECISIONS THAT YOU WILL MAKE IN THIS EXPERIMENT

Each decision that you make will be similar to the following:

Example: Each of the three representatives has 5 tokens to allocate. You (and your group) will earn 1 cent for each token that you invest in project A. For each token that you invest in project B, you (and your group) will earn 0.75 cents and the other representatives (and their groups) will earn 0.75 cents (a total of 2.25 cents for all of you together).

For each token that the other representatives invest in project A, their respective group will earn 1 cent. For each token that the other representatives invest in project B, this representative and associated group will earn 0.75 cents and you and your group will earn 0.75 cents (a total of 2.25 cents for all of you together).

In summary, you (and your group) will earn:

1 cent multiplied by the number of tokens you invest in project A

+0.75 cents multiplied by the number of tokens that you invest in project B
+0.75 cents multiplied by the number of tokens that the other representatives invest in project B

Any amount you earn now, as a group representative, will be divided equally among you and the other members of your group.

The cents in this experiment are converted into €/Yen in the following manner: 1 cent = 0.02 €/3 Yen.

If you have any questions now, please ask the experimenter. If you have no questions and we can start, please press “ok.”

(* test starts)

(* chat starts)

(* PG game starts)

Appendix II - Questionnaires

Identification

- 1) I have positive feelings towards my team members
- 2) I have confidence in my team members
- 3) I feel comfortable depending on my team members
- 4) I think the other team members performed well
- 5) I think that, generally speaking, I have more in common with the members of this team than with the members of the other teams
- 6) I trust all of the members of my team equally well

Answers to the identification questions were based on a 6-point Likert scale.

Accountability

- 7) I feel accountable for my actions in this experiment.
- 8) I feel that my group members hold me accountable for my decisions.
- 9) If things don't go the way they should, my group members will be angry with me.
- 10) If things go well, my group members will be happy with me.
- 11) The success of my group members depends on me.
- 12) I feel that I would like to be able to explain why I did certain things in this experiment.
- 13) Overall, my efforts in this experiment were very important.

Answers to the accountability questions were based on an 8-point Likert scale.

自生的なグループ形成とエージェント間の協調行動

京都産業大学経済学部 ○小林 洋平, 舛本 現

京都大学経済学研究科 川村 哲也

An endogenous group formation and cooperative action among agents.

○ Yohei KOBAYASHI and Gen MASUMOTO Kyoto Sangyo Univ.

Tetuya KAWAMURA Kyoto Univ.

Abstract: The Sanction system is one of the ideal institution which solve the social dilemma situation. We verify whether the sanction system endogenously happen among the persons who face the social dilemma or not. And when such system happen, we explore how the system work in social dilemma, and what situation supports the function of the system.

1. 背景と目的

共有地の悲劇に代表されるN人囚人のジレンマ(社会的ジレンマSD)状況の解決方法は多様な文脈の中で研究され、ジレンマ状況の解決による協調行動の達成が多様な方法で可能であることが示されている。進化生物学では、血縁淘汰、空間の導入、個体遭遇率の特性に対する非対称性などにより、協調的個体の繁栄が達成されることが示されている。

社会科学における人間をゲームのプレイヤーとしたSD研究では、評判効果による対戦相手の選別や懲罰行動の導入による解決策が示されている。特に懲罰行動によるSDの解決を検証した研究は数多い。

明示的に懲罰を行うステージを導入したゲームモデルでなくとも、SDゲームを繰り返す状況を考えて、しっぺ返し戦略や、トリガー戦略など報復行動を含む戦略が、実効性のある脅しとして機能し、協調行動が達成されることが明らかにされている。SD後に非協力者に対して、協力者がコストを払って懲罰を行うステージを付け加えた多段階ゲームにおいては、ゲームの繰り返しなしでも、協調行動を誘発することが可能である。すなわち、コストを払えば、非協力者に対して罰則を機械的に与える第三者機関が存在する制度が成立している場合、このようなゲーム構造を仮定できる。

しかし、このような制度を仮定しない場合、懲罰行動がコストを伴う為、協力者が懲罰を行うか否かは自明ではない。実際、十分な数の協力者が懲罰を行うことがわかっているならば、自分が懲罰をしなくとも、SDの解決が達成できる余地がありうる。しかし、協力者全員がこのように考えると、懲罰行動は実際には実行されず、SDは解決されない。従って、SD後の懲罰を行うか否かというサブゲームはSDの構造をしている。

この第二のSDの解決の為、アクセルロッドは非懲罰者に対する懲罰行動を導入するメタパニッシュゲームによる解決策を提示した。また、岡田は第一のSDを行う前に、懲罰行動を実行するか否かを決定するゲームに参加するか否かを意思決定させる、三段階ゲームの構造によって、懲罰行動を行うプレイヤーを囲い込むことにより、第二のSDにおいてフリーライダーが存在する場合でも協調行動が維持可能であることを示した。ここで、第二のSDの解決に用い

られている手法は、懲罰と特定プレイヤーの選抜という手法であり、第一のSDと第二のSDの解決方法に用いられるロジックは同じである。

すなわち、SDの解決において本質的に重要なのは、懲罰とプレイヤーの選抜が如何にしてプレイヤーの自主的行動から自生的に発生してくるかを検証することである。実際に、懲罰を行うか否かの選択をプレイヤーにゆだねたほうが、協力を誘発しやすいという結果が被験者実験により明らかにされている。本稿では、罰則付きSDゲーム(SSD)と通常のSDゲームをエージェントが自由に選べるという、ゲーム選択を戦略として含むモデルをシミュレーションで考察することによりSDの解決問題の本質に迫る。このモデルで、懲罰行動が実行され、第一、第二のSD問題が解決される協調状態が生じる場合、その状態は、懲罰を背景としたSDの解決が自生的に発生した状態であり、自生的秩序による協調状態の創発である。また、この協調状態を支える懲罰を背景としたメカニズムは、ゲームのプレイヤーとして記述されない第三者機関を必要としない内生的な制度である。

2. 方法

本研究では100体のエージェントに5人囚人のジレンマゲームを行わせて、その時の協調行動について観察する。この時、あらかじめ固定されたゲーム(SD or SSD)のみを行わせた場合と、エージェントがそれらを選択できた場合における協調行動の割合を比較する。各ゲームの利得は以下のように設定した。

$$\text{SD:} \\ C : 0.5 + 2 * C_{ratio} \quad D : 1.5 + 2 * C_{ratio}$$

$$\text{SSD:} \\ C_{np} : 0.5 + 2 * C_{ratio} \quad D : 1.5 + 2 * C_{ratio} - 2 * P_{ratio} \\ C_p : 2 * C_{ratio}$$

ここで C_{ratio} と P_{ratio} はそれぞれ協調と懲罰を行ったエージェントの割合である。また、 C_{np} は協調したが懲罰を行わなかったプレイヤー、 C_p は懲罰を行ったプレイヤーである。このように全員がDを選択するより、全員がCを選択すれば全体として利得は高まる。し

かしいかなる場合においても、個人内ではDを出す方が利得が高くなる。またSSDはSDと比較して、懲罰とコストの分だけ利得が減少する。

シミュレーションはFig.1のようなDeterministic Finite Automata (以下DFA) を用いた進化エージェントベースとする。各エージェントは個別に戦略を記述したDFAを内包し、過去に得られた他のエージェントの協調率と懲罰率を入力として内部状態が変化し、それに応じて次の手を決定する。Fig.1はその戦略の典型例のしっぺ返し戦略とトリガー戦略をDFAで記述したものである。各個体はそれぞれ、SD, SSD, それぞれについての2種類の独立したDFAと協調や懲罰の率に関する閾値を持っている。また懲罰に関しては前回の協調率と懲罰率に係数をかけた値を評価値として、ある閾値との大小関係から懲罰を行うかどうかを決定する。そのゲームにおける協調率が入力されると、各エージェントはその閾値によって0, 1に変換し、DFAへの入力とする。

ゲームの繰り返しはFig.2のようにして行った。各エージェントはどちらかのゲームを選び、その中で繰り返してゲームを行う。各ゲームの中でランダムにエージェントが5人ずつ選ばれ、20回の繰り返し囚人のジレンマゲームを行う。これを両ゲームであわせて200回行った後、各エージェントの得た1グループあたりの平均利得を求めて淘汰を行う。淘汰は得た平均利得を適応値としてルーレットによっておこなった。また同時に突然変異として0.5%の確率でDFAの構造や各閾値を変化させた。

3. 結果と考察

まずSSD単体でゲームを繰り返し行った場合における協調行動の生成と崩壊の典型例をFig.3に示す。このようにSSD単体のゲームでは懲罰率が上昇すると同時に協調率も上昇する。これは自生的 sanction system が成立している。しかしながら、懲罰率が下がることによって第二のSDの問題が生じ協調が崩壊する。次にエージェントにゲームを選択させた場合の結果をFig.4, Fig.5に示す。この時のゲーム選択は懲罰のしやすさと関連性がある行動を行うエージェントを用いている。このようにゲームを選択させるとSSDにおける協力率が比較的安定して得られることがわかる。また人数比はSSDの方がおおむね多いが、その人数は常に安定しているわけでもないことがわかる。

ここでSDとSSDの利得について比較すると、SSDでは懲罰やそれにかかるコストがあるため、SDよりも期待される利得は低い。しかしながら、結果的にはSSDを選択するエージェントが多く現れ、また、協調行動を自生的に維持することができた。このことはあらかじめゲームを選択させることが、その後の行動の選択にに何らかの拘束をもたらしており、sanction systemが維持される結果となったのではないかと考えられる。

参考文献

- 1) 青木昌彦他, "比較制度分析に向けて"
- 2) Robert Axelrod, "An Evolutionary approach to norms," American political science review vol.80 NO.4 (1986)
- 3) Akira Okada, "The possibility of cooperation in an n-person prisoners' dilemma with institutional arrangements.," Public Choice Vol. 77, pp.629-656 (1993)

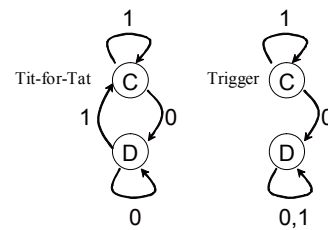


Fig.1 Some typical strategies described by DFA.

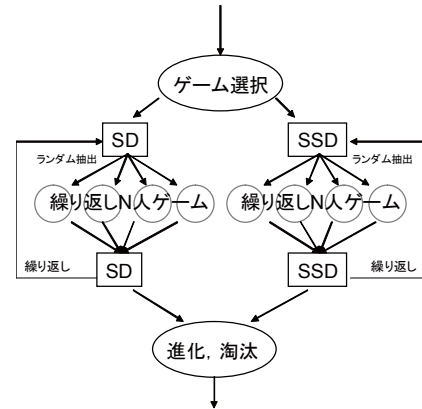


Fig.2 The game flowchart in a generation.

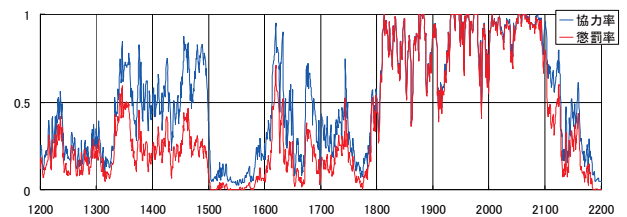


Fig.3 The result of C_{ratio} and P_{ratio} in SSD game.

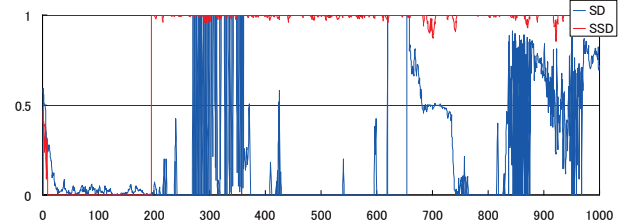


Fig.4 The result of C_{ratio} in each SD and SSDgame.

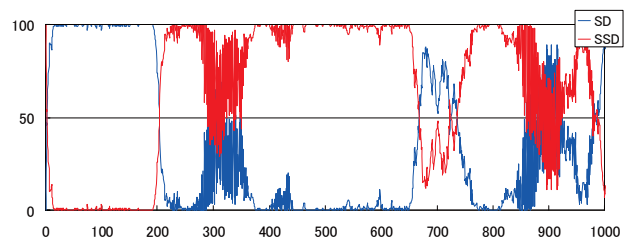


Fig.5 The result of population numbers of SD and SSDgame.

- 4) Vladimir Akimov and Mikhail Soutchanski "Automata Simulation of N-Person Social Dilemma Games", The Journal of Conflict Resolution, Vol. 38, No. 1, pp. 138-148 (1994)
- 5) Kristian Lindgren and Johan Johanssonb "Coevolution of strategies in n-person Prisoner's Dilemma", Santa Fe Institute.(1998)
- 6) 鈴木麗壘, 有田隆也 "N 人版繰り返し囚人のジレンマゲームにおける空間的局所性の進化", The 15th Annual Conference of Japanese Society for Artificial Intelligence, (2001)

False-Name-Proof Mechanisms for Hiring a Team

(Extended Abstract for WINE 2007)

Atsushi Iwasaki* David Kempe† Yasumasa Saito* Mahyar Salek† Makoto Yokoo*

July 17, 2007

Abstract

We study the problem of hiring a team of selfish agents to perform a task. Each agent is assumed to own one or more elements of a set system, and the auctioneer is trying to purchase a feasible solution by conducting an auction. For instance, in the well-studied case of path auctions, each agent owns one or more edges of a graph, and the auctioneer is trying to buy an s - t path from a source node to a terminal node. The area of truthful mechanism design deals with designing the auction mechanism such that it is in the agents' best interest to reveal their true cost for each element. However, a second concern has so far not been considered for this type of auctions: agents may not reveal ownership of all their elements, and instead pretend to be different entities if it benefits them financially. Such manipulations are called "false-name bids", and have only recently been studied in the context of combinatorial auctions by Yokoo et al.

In this paper, we study false-name manipulations in a scenario in which even the set system may not be completely known to the auctioneer. More precisely, an agent can pretend that an element is in fact a set of multiple elements, all of which must be purchased from different owners. This type of manipulations has not been considered in the context of false-name-proof combinatorial procurement auctions, which are similar to the auctions for hiring a team.

We first propose and analyze a false-name-proof mechanism for the special cases where each agent owns only one element in reality. We prove that its frugality ratio is bounded by $n2^n$, which nearly matches a lower bound of $\Omega(2^n)$ for all false-name-proof mechanisms in this scenario. We then propose a second mechanism. It requires the auctioneer to choose a reserve cost a priori, and thus does not always purchase a solution. In return, it is false-name-proof for general cases where an agent may have multiple elements. Also, the sum of the payments never exceeds the reserve cost. Since its frugality ratio depends on the reserve cost set by the auctioneer, we experimentally evaluate the payment (as well as social surplus) of the second mechanism through simulation.

1 Introduction

One of the important challenges of electronic commerce, in particular in large-scale settings such as the Internet, is to design protocols for dealing with parties having diverse and selfish interests. Frequently, one of the most convenient ways of structuring these interactions is via *auctions*: based on bids submitted by the participants, the auctioneer chooses whom to sell items to or purchase them from, and decides on appropriate payments. The analytical study of auctions for e-commerce has recently led to very fruitful interactions between the fields of economics, game theory, theoretical computer science and artificial intelligence.

While single-item auctions have a long history of study in economics (see, e.g., [15, 16]), the problem is significantly more complex when there are combinatorial dependencies between items. In a *combinatorial auction* [27], the auctioneer has a set of items for sale, and agents submit bids for different subsets. Each item can only be assigned to one agent. In the problem of *hiring a team of agents* [2, 10, 30], the auctioneer needs to hire a team of agents to perform a complex task. The auctioneer knows which subsets of agents can perform the task together,

*Department of ISEE, Kyushu University, {iwasaki@, saito@agent, yokoo@}is.kyushu-u.ac.jp

†Department of Computer Science, University of Southern California, {dkempe, salek}@usc.edu

and must select such a *feasible set* based on bids by the agents, without knowing their true incurred costs. A special case of this general class that has received particularly detailed study is that of a *path auction* [2, 8, 14, 22]: the agents own edges of a known graph, and the auctioneer wants to purchase an s - t path.

In designing auctions for hiring a team, it is important to keep in mind that selfish agents will take whichever action benefits them most. This includes misrepresenting their incurred cost or their identity. From the auctioneer’s perspective, it is desirable that selfish agents have an incentive to comply with the auction. The area of designing such auctions is known as *mechanism design* [19, 22, 24]. In particular, there has been a lot of recent focus on the design of *truthful* auctions, in which it is in the agents’ best interest to reveal their true costs to the auctioneer. By the revelation principle [19], truthfulness is without loss of generality equivalent to having dominant strategies.

While the concept of truthfulness addresses the case that agents may misrepresent their true costs, there is a second way in which agents could selfishly cheat: an agent owning multiple elements of a set system (such as multiple edges in a graph) may choose different identities for interacting with the auctioneer, to obtain higher payments. Similarly, an agent owning one element may be able to pretend that this element is in fact a set of multiple elements, owned by different agents, to obtain payments for all of these “pseudo-agents”. Such behavior is called *false-name manipulation*, and was recently studied by Yokoo et al. in the context of combinatorial auctions [34, 35], where it was shown that for any Pareto efficient auction, agents can profit by submitting bids as two identities.

1.1 Our contributions

In this paper, we introduce a model of false-name manipulation in auctions for hiring a team, such as s - t path auctions. In this model, the set system structure and element ownership are not completely known to the auctioneer. Thus, in order to increase profit, an agent who owns an element can pretend that the element is in fact a set consisting of multiple elements owned by different agents. Similarly, an agent owning multiple elements can submit bids for these elements under different identities. We call a mechanism *false-name-proof* if it is truthful, and a dominant strategy is for each agent to reveal ownership of all elements.

Our first main contribution is a false-name-proof mechanism MP for the special case, in which each agent owns exactly one element. This mechanism introduces an exponential multiplicative penalty against sets in the number of participating agents. We analyze its frugality ratio according to the definition of Karlin et al. [14], and show that its frugality ratio is at most $n2^n$ for all set systems of n elements. While this exponential frugality ratio of MP may appear bad, we also prove that *every* false-name-proof mechanism must have a frugality ratio of $\Omega(2^n)$ in the worst case. Thus, the MP mechanism is optimal up to a factor of n . These results are discussed in Section 3.

For the general case, in which agents may own multiple elements, we present another false-name-proof mechanism AP in Section 4. As opposed to the MP, it requires the auctioneer to choose a reserve cost r a priori and imposes an additive penalty increasing in the number of agents in the chosen solution. Thus, it will not purchase a solution unless there is a solution whose cost (including the penalty) is at most r . In return, it is false-name-proof without any assumptions on element ownership. Also, it is guaranteed that the sum of the payments never exceeds the reserve cost. This means that the frugality ratio of this mechanism depends on the reserve cost. We investigate the AP mechanism experimentally for s - t path auctions on random graphs in Section 5. The results show that the AP provides social surplus not too far from a Pareto-efficient one at an appropriate reserve cost. Also, the payments of the AP is smaller than the Vickrey-Clarke-Groves (VCG) mechanism when the reserve cost is small, while it becomes higher than the VCG when the reserve cost is high. However, the payment never exceeds the reserve cost.

1.2 Related Work

Motivated by the need to deal with selfish users, there has been a large body of recent work at the intersection of game theory, economic theory and theoretical computer science (see, e.g., [20, 24]). For instance, the seminal paper of Nisan and Ronen [22], which introduced mechanism design to the theoretical computer science community, studied the tradeoffs between agents’ incentives and computational complexity. The loss of efficiency in network games due to selfish user behavior has been studied in the contexts of the “price of anarchy” (see, e.g., [24, 26]), and the “price of stability” (see [1]).

The problem of hiring a team of agents in complex settings, at minimum total cost, has been shown to have many practical economic applications (see [9, 23, 18, 21] for examples). In particular, the path auction problem has been the subject of a significant amount of prior research. The traditional economics approach to payment minimization (or profit maximization) is to construct the optimal Bayesian auction given the prior distributions from which agents' private values are drawn. Indeed, path auctions and similar problems have been studied recently from the Bayesian perspective in [8, 6]. Here, we instead follow the approach pioneered by Archer, Tardos, Talwar and others [2, 4, 14, 30], and study the problem from a worst-case perspective. Significant insight can be gained from an understanding of worst-case performance, and it enables an uninformed or only partially informed auctioneer to evaluate the trade-off between an auction tailored to assumptions about bidder valuations (which may or may not be correct) versus an auction designed to work as well as possible under unknown and worst-case market conditions.

If the sole goal of the auctioneer is truthfulness, and false-name bids are not a concern, then it has long been known that the VCG mechanism [31, 5, 11] gives a truthful mechanism and identifies the Pareto optimal solution. It is based on Vickrey's classical Second-Price Auction [31], which is truthful for single-item auctions. As shown in past work (see, e.g., [2]), the payments of the VCG mechanism can be significantly higher than the cheapest alternative solution. Based on this observation, several papers [2, 8, 14, 30] have investigated the *frugality* of mechanisms, the overpayment compared to a natural lower bound. In particular, [14] presents a mechanism called the \surd mechanism achieving frugality ratio within a constant factor of optimal for s - t path auctions in graphs. Traditionally, for "hiring a team" auctions, *incentive compatibility* has only been associated with making revelation of *true costs* a dominant strategy for each bidder.

In this paper, we extend the notion to *false-name-proof* mechanisms by requiring agents to truthfully reveal ownership of all their elements as well. As in the case of strategy-proof mechanisms, the revelation principle holds for false-name-proof mechanisms [35]. While VCG is truthful and Pareto efficient in the traditional model, it is not false-name-proof and cannot guarantee a Pareto efficient solution in the presence of false-name bids. Yokoo et al. [13, 28, 29, 33, 34] developed several false-name-proof mechanisms for various special cases of combinatorial auctions and combinatorial procurement auctions.

Combinatorial procurement auctions are quite similar to the auctions for hiring a team. There exists a set of tasks to be assigned to agents (service providers). If we assume an element (in our model) as a certain skill/capability to perform a task, we can model an auction for hiring a team as one instance of combinatorial procurement auctions.¹ However, in a combinatorial procurement auction, we usually assume that the auctioneer has a predefined set of tasks, where each task cannot be divided into smaller subtasks. However, in our model, we assume an agent can self-divide, i.e., divide an element into smaller sub-elements. Therefore, we cannot apply false-name-proof combinatorial procurement auction mechanisms presented in [28, 29]. Even if we consider identifier splitting only, the mechanism presented in [28] requires that the utility of the auctioneer be additive, i.e., the sum of the utilities of sub-tasks performed by agents. This is not true in path auctions, where the preference of the auctioneer is all-or-nothing, i.e., if the auctioneer fails to buy a single link in a path, the rest of the links in the path are useless. [29] presents a mechanism that can be used when the preference of the auctioneer is not additive. However, the assumption in this mechanism is that the auctioneer can perform each sub-task with a certain cost by himself. In our scenario, this would imply that the auctioneer owns a parallel edge for each edge in the graph.

For the specific case of path auctions, the impact of false-name bids was recently studied by Du et al. [7]. They studied the model in which agents can own multiple edges, and showed that there is no false-name-proof and efficient mechanism. Furthermore, they show that if bids are anonymous, i.e., agents do not report any identity for edge ownership, then no mechanism can be strategy-proof. Notice that this does not preclude false-name-proof and truthful mechanisms in which the auctioneer takes ownership of multiple edge by the same agent into account, and rewards the agent accordingly.

The problems in the design of incentive-compatible mechanisms caused by unknown domains have also been studied in the context of combinatorial auctions by Babaioff et al. [3]. Among others, they show that useful monotonicity characterizations of incentive compatible mechanisms can break down in the case of unknown domains for individual agents.

¹Another difference is that in a combinatorial procurement auction, we usually assume more complex utility functions of the auctioneer/agents, e.g., the utility of the auctioneer can be positive even if only a part of the tasks is assigned.

2 Preliminaries

We begin by defining formally the framework for auctions to hire a team. Our framework is based on that of [2, 4, 14, 30]. We have a *set system* $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$, specified by a set E of n elements, a collection $\mathcal{F} \subseteq 2^E$ of *feasible sets*, a partition \mathcal{A} of E , whose element is a subset of E . For instance, in the important special case of an s - t path auction, $S \in \mathcal{F}$ if and only if S is an s - t path.

In previous work on “hiring a team” auctions, each element e was associated with a different selfish agent. Here, we depart from this assumption, in that an agent may own *multiple* elements. We use $A^i \in \mathcal{A}$ to denote the set of elements owned by agent i . We call i the *owner* of e , and denote it by $i = o(e)$. Each element e has an associated *cost* c_e , the true cost that its owner will incur if it is selected by the mechanism.² This cost is *private*, i.e., known only to the agent $o(e)$. An *auction* consists of two steps:

1. Each agent i submits sealed bids $(b_e, \tilde{o}(e))$ for elements e , where $\tilde{o}(e)$ denotes the identifier of e 's purported owner (which need not be the actual owner).
2. Based on the bids, the auctioneer selects a feasible set $S^* \in \mathcal{F}$ as the winner, and computes a payment p_i for each agent i with an element e such that $i = \tilde{o}(e)$. We say that the elements $e \in S^*$ *win*, and all other elements *lose*.

The *profit* of an agent i is the sum of all payments it receives, minus the incurred cost $c(S^* \cap A^i)$. We assume that both the selection rule and the algorithm for computing payments are common knowledge among the agents. The agents will exploit this knowledge to choose an action maximizing their own profit. In particular, this may include misrepresenting the cost of elements, or misrepresenting ownership. However, we assume that agents do not collude. Past work on incentive compatible mechanisms has focused on *truthful* mechanisms. That is, the assumption was that each agent i submits bids only for elements $e \in A^i$ she actually owns, and reports correct ownership $o(e) = i$ for all of them. In that case, a mechanism is truthful by definition if for any fixed vector b^{-i} of bids by all agents other than i , it is in agents i 's best interest to bid $b_e = c_e$ for all $e \in A^i$, i.e., agent e 's profit is maximized by bidding $b_e = c_e$ for all these elements e .

In this paper, we extend the study of truthful mechanisms to take into account *false-name manipulation*: agents claiming ownership of non-existent elements or choosing not to disclose ownership of elements. Specifically, we focus on two types of false-name manipulation: identifier splitting and self-division.

Identifier Splitting is the most natural form of false-name bidding on the part of an agent, and the one studied in the past for combinatorial auctions, by Yokoo et al. [34, 35]. The notion of self-division is motivated by graph-theoretic problems (such as shortest paths), when there is uncertainty on the part of the auctioneer about the underlying set system.

Definition 1 (Identifier Splitting) *An agent i owning a set A^i may choose to use different identifiers in her bid for some or all of the elements. Formally, the set system $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ is replaced by $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A}')$, where $A' = A \setminus \{A^i\} \cup \{A^{i'}\} \cup \{A^{i''}\}$, where $A^i = A^{i'} \cup A^{i''}$*

Definition 2 (Self-Division) *An agent i owning element e is said to self-divide e if e is replaced by two elements e_1 and e_2 . Formally, the set system $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ is replaced by $(E', \mathcal{F}', \mathcal{A}')$, whose elements are $E' = E \setminus \{e\} \cup \{e_1, e_2\}$, such that the feasible sets \mathcal{F}' are exactly those sets S not containing e , as well as sets $S \setminus \{e\} \cup \{e_1, e_2\}$ for all feasible sets $S \in \mathcal{F}$ containing e .*

Intuitively, self-division allows an agent to pretend that multiple distinct agents are involved in doing the work of element e , and that each of them must be paid separately. Thus, for self-division to be useful, it will always be combined with identifier splitting. Notice that for self-division to be a threat, there must be uncertainty on the part of the auctioneer about the true set system $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$. In both identifier splitting and self-division, we will sometimes refer to the new agents i' whose existence i invents as *pseudo-agents*.

²For costs, bids, etc., we extend the notation by writing $c(S) = \sum_{e \in S} c_e$ and $b(S) = \sum_{e \in S} b_e$, etc.

In this paper, we investigate mechanisms that are *false-name-proof*. In a false-name-proof mechanism, it is a dominant strategy for each agent i to simply report the pair (c_e, i) as a bid for each element $e \in A^i$. Thus, neither identifier splitting, nor self-division nor bids $b_e \neq c_e$ can increase the agent's profit. Among other things, this allows us to use b_e and c_e interchangeably when discussing false-name-proof mechanisms. Notice that we explicitly define the concept of false-name-proof mechanisms to imply that the mechanism is also truthful when each agent i owns only one element.

In discussing mechanisms that are false-name-proof against identifier splitting and self-division, notice that it is meaningless to talk about a false-name-proof mechanism for an individual set system, as the auctioneer does not know a priori what the set system is. Hence, we define *classes of set systems susceptible to the false-name manipulations*, as the candidate classes on which mechanisms must operate.

Definition 3 For two set systems $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ and $(E', \mathcal{F}', \mathcal{A}')$, we say $(E', \mathcal{F}', \mathcal{A}')$ is *reachable* from $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ by false-name manipulation if $(E', \mathcal{F}', \mathcal{A}')$ is obtained by (repeatedly) applying identifier-splitting and self-division.

Definition 4 A class \mathcal{C} of set systems is *susceptible to false-name manipulation* iff for each set system $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ in the class, any set system $(E', \mathcal{F}', \mathcal{A}')$, which is reachable from $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ by false-name manipulations, is also in class \mathcal{C} .

Notice that s - t path auction set systems are susceptible to false-name manipulations that include self-division, whereas minimum spanning tree set systems are not. This is because if an agent uses self-division, feasible sets will change. On the other hand, minimum Steiner tree set systems with a fixed set of terminals are susceptible to false-name manipulation.

2.1 Efficiency and Frugality

In designing and analyzing a mechanism for hiring a team, there are several other desirable properties besides being false-name-proof (or at least truthful). Two particularly important ones are efficiency and frugality.

A mechanism is *Pareto efficient* if it always maximizes the sum of all participants' utilities (including that of the auctioneer). This maximizes social surplus. In the case of hiring a team, the auctioneer's utility is exactly $-\sum_i p_i$, the negative of the sum of all payments. Hence, all payments cancel out, and a mechanism is Pareto efficient if and only if it always purchases the cheapest team or s - t path. While it is well known that the VCG mechanism is truthful and Pareto efficient [31, 5, 11], Du et al. [7] show that there is no Pareto efficient and false-name-proof mechanism, even for s - t path auctions. Yokoo et al. [35] showed the same for combinatorial auctions.

While Pareto efficient mechanisms maximize social welfare, an auctioneer is frequently more interested in minimizing his payments. The two are not equivalent, for instance by Karlin et al. [14], the Pareto efficient VCG mechanism can overpay significantly compared to other mechanisms for some set systems. In order to analyze the overpayments of false-name-proof mechanisms, we use the definition of *frugality ratio* from [14]. The idea of the frugality ratio is to compare the payments to a "natural" lower bound, generalizing the idea of the second lowest cost (it is easy to observe that no meaningful ratio is possible when comparing to the actual lowest cost).

Definition 5 Let $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ be a set system, and S the cheapest feasible set with respect to the true costs c_e (where ties are broken lexicographically). For any vector of actual costs \mathbf{c} for elements, we define $\nu(\mathbf{c})$ to be the solution to the following optimization problem.

Minimize $\sum_{e \in S} b_e$ subject to

(1) $b_e \geq c_e$ for all e

(2) $b(S \setminus T) \leq c(T \setminus S)$ for all $T \in \mathcal{F}$

(3) For every $e \in S$, there is a $T_e \in \mathcal{F}$ such that $e \notin T_e$ and $b(S \setminus T_e) = c(T_e \setminus S)$

This definition essentially captures the payments in a "cheapest Nash Equilibrium" of a first-price auction — with the caveat that first-price auctions frequently do not have Nash Equilibria [12]. Using the quantity $\nu(\mathbf{c})$, we define the frugality ratio of a mechanism.

Definition 6 The frugality of a mechanism \mathcal{M} for a set system $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ is

$$\phi_{\mathcal{M}} = \sup_{\mathbf{c}} \frac{p_{\mathcal{M}}(\mathbf{c})}{v(\mathbf{c})},$$

i.e., the worst case, over all cost vectors \mathbf{c} , of the overpayment compared to the “first-price” payments. Here, $p_{\mathcal{M}}(\mathbf{c})$ denotes the total payments made by \mathcal{M} when the cost vector is \mathbf{c} .

3 A Multiplicative Penalty Mechanism

In this section, we focus on a mechanism MP with *multiplicative penalties*, for arbitrary “hiring a team” instances. The MP mechanism always buys a solution, and it is false-name-proof; it requires that each agent own one element only.³ We analyze the frugality ratio of MP for arbitrary instances, and prove that it is $O(n2^n)$, nearly matching a lower bound of $\Omega(2^n)$ for any false-name-proof mechanism.

3.1 The Mechanism MP

The mechanism MP is based on exponential multiplicative penalties. It is false-name-proof for arbitrary classes of set systems susceptible to false-name manipulation, so long as each agent only owns one element. We will therefore identify elements e with agents. In the rest of this section, we will abbreviate a set system $(E, \mathcal{F}, \mathcal{A})$ as (E, \mathcal{F}) . Since we assume each agent owns exactly one element, \mathcal{A} is automatically determined by E . After the agents submit bids b_e for elements, the mechanism MP chooses the set S^* minimizing $b(S) \cdot 2^{|S|-1}$, among all feasible sets $S \in \mathcal{F}$. Each agent $e \in S^*$ is then paid the threshold bid $2^{|S^*-e|-|S^*|} b(S^*-e) - b(S^* \setminus \{e\})$, where S^*-e denote the best solution (with respect to the objective function $b(S) \cdot 2^{|S|-1}$) among feasible sets S not containing e .

Theorem 7 For all classes of set systems susceptible to self-division, MP is false-name-proof. Furthermore, it has frugality ratio $O(n \cdot 2^n)$, where $n = |E|$.

Proof. Because we assumed that each agent owns only one element, we can identify agents and elements. If an agent $e = e_0$ self-divides into $k + 1$ elements e_0, \dots, e_k , then either all of the e_i or none of them are included in any feasible set S . Let $\tau(e)$ be the original threshold of agent e ; so e wins with bids $b_e \leq \tau(e)$. Since all of its k self-division elements will always be part of the same set, we can always think of just one threshold for the agent e : if the sum of the bids of all the new elements e_j exceeds this threshold $\tau_k(e)$, then e loses; otherwise, it is paid at most $(k + 1)\tau_k(e)$.

This new threshold satisfies $\tau_k(e) \leq 2^{-k}\tau(e)$, from the definition of the MP mechanism. If e still wins after self-division (otherwise, there clearly is no incentive to self-divide), the total payment to e is $(k + 1)2^{-k}\tau(e)$. The alternative of not self-dividing, and submitting a bid of 0, yields a payment of $\tau(e) \geq (k + 1)2^{-k}\tau(e)$. Thus, refraining from self-division is a dominant strategy (assuming for now the possibility of false bids.)

Given that no agent will submit false-name bids, it now follows immediately from the monotonicity of the selection rule that the mechanism is also truthful. Thus, we have established that the mechanism is incentive compatible, and we can assume that $b_e = c_e$ for all agents e . To prove the upper bound on the frugality ratio, consider again any winning agent $e \in S^*$. The threshold bid is

$$\tau(e) = \min_{T \in \mathcal{F}: e \notin T} 2^{|T|-|S^*|} c(T) - c(S^* \setminus \{e\}).$$

The total payment is the sum of individual thresholds for the winning set S^* , i.e.,

$$\begin{aligned} p_{\text{MP}}(\mathbf{c}) &= \sum_{e \in S^*} \tau(e) \\ &= \sum_{e \in S^*} \min_{T \in \mathcal{F}: e \notin T} 2^{|T|-|S^*|} c(T) - c(S^* \setminus \{e\}) \\ &\leq \sum_{e \in S^*} \min_{T \in \mathcal{F}: e \notin T} 2^{|T|-|S^*|} c(T) \\ &\leq 2^n \sum_{e \in S^*} \min_{T \in \mathcal{F}: e \notin T} c(T). \end{aligned}$$

³In fact, the MP mechanism works even if an agent owns multiple elements, so long as all of these elements are required at the same time. In other words, if we can consider a set of elements as a virtual single element, the MP mechanism is false-name-proof.

To obtain from this upper bound on the payments the frugality ratio, we need a lower bound on the value $\nu(\mathbf{c})$ (see Definition 6). Let S be the cheapest solution with respect to the c_e , i.e., without regard to the sizes of the sets. By Definition 5, $\nu(\mathbf{c}) = \sum_{e \in S} b_e$, subject to the constraints of the mathematical program given. Focusing on any fixed agent e' , we let $T_{e'}$ denote the set from the third constraint of Definition 5, and can rewrite

$$\nu(\mathbf{c}) = \sum_{e \in S - T_{e'}} b_e + \sum_{e \in S \cap T_{e'}} b_e = \sum_{e \in T_{e'} - S} c_e + \sum_{e \in T_{e'} \cap S} b_e \geq c(T_{e'}). \quad (1)$$

Since Inequality (1) holds for all e' , we have proved that $\nu(\mathbf{c}) \geq \max_{e \in S} c(T_e)$. On the other hand we can further bound the payments by

$$\begin{aligned} p_{\text{MP}}(\mathbf{c}) &\leq 2^n \sum_{e \in S^*} \min_{T \in \mathcal{F}: e \notin T} c(T) \\ &\leq n2^n \max_{e \in S^*} \min_{T \in \mathcal{F}: e \notin T} c(T) \\ &\leq n2^n \max_{e \in S} \min_{T \in \mathcal{F}: e \notin T} c(T) \\ &\leq n2^n \max_{e \in S} c(T_e). \end{aligned}$$

Here, the second-to-last inequality followed because for all $e \in S^* \setminus S$, the minimizing set T is actually equal to S , and therefore cannot have larger cost than $c(T_e)$ for any $e \in S$, by definition of S . Thus, the frugality ratio of MP is

$$\phi_{\text{MP}} = \sup_{\mathbf{c}} \frac{p_{\text{MP}}(\mathbf{c})}{\nu(\mathbf{c})} \leq \frac{n2^n \max_{e \in S} c(T_e)}{\max_{e \in S} c(T_e)} = n2^n. \quad \blacksquare$$

3.2 An Exponential Lower Bound

An exponentially large frugality ratio is not desirable. Unfortunately, any mechanism which is false-name-proof will have to incur such a penalty. Below, we prove a lower bound of $\Omega(2^n)$ for all false-name-proof and truthful mechanisms for all classes of monopoly-free set systems susceptible to false-name manipulation.

Theorem 8 *Let \mathcal{C} be any class of monopoly free set systems susceptible to false-name manipulation, and \mathcal{M} be any truthful and false-name-proof mechanism for \mathcal{C} . Then, the frugality ratio of \mathcal{M} on \mathcal{C} is $\Omega(2^n)$ for set systems with $|E| = n$.*

Proof. Let $(E_0, F_0) \in \mathcal{C}$ be a set system minimizing $|E_0|$. Consider the result of \mathcal{M} when all agents $e \in E_0$ bid 0. Let $S^* \in F_0$ be the set winning in this case, and let $e \in S^*$ be arbitrary, but fixed. Because (E_0, F_0) is monopoly free, there must be a feasible set $T \in F_0$ with $e \notin T$ and $T \not\subseteq S^*$. Among all such sets T , let T_e be the one minimizing $|S^* \cup T|$, and let \hat{e} in T_e be arbitrary. Define $Z = T_e \cup S^* \setminus \{e, \hat{e}\}$ (the ‘‘zero bidders’’), and $I = E_0 \setminus (T_e \cup S^*)$ (the ‘‘infinity bidders’’). Consider the following bid vector: both e and \hat{e} bid 1, all agents $e' \in Z$ bid 0, and all agents $e' \in I$ bid ∞ . Let W be the winning set. We claim that W must contain at least one of e and \hat{e} (w.l.o.g., assume that $e \in W$). For W cannot contain any of the infinity bidders. And if it contained neither e nor \hat{e} , then W would have been a candidate for T_e with smaller $|W \cup S^*|$, which would contradict the choice of T_e .

We will next consider the result of self-dividing the agent e into new agents e_0, \dots, e_k . Thus, all agents $e' \neq e$ stay the same, and the feasible sets are exactly those $S \in F_0$ with $e \notin S$, and those S with $\{e_0, \dots, e_k\} \subseteq S$ and $S \setminus \{e_0, \dots, e_k\} \cup \{e\} \in F_0$. Let (E_k, F_k) denote the set system resulting from k -wise self-division (for $k \geq 0$). Define $\tau(j, k)$, for $j = 0, \dots, k$, to be the threshold bid under \mathcal{M} for agent e_j in the set system (E_k, F_k) , given that all $e' \in Z$ bid 0, all $e' \in I$ bid ∞ , and all e_i for $i \neq j$ also bid 0, while \hat{e} bids 1. Above, we thus showed that $1 \leq \tau(0, 0) < \infty$.

We now show by induction on d that for all d , there exists an $h \leq d$ such that

$$2^{-d} \sum_{i=0}^k \tau(i, k) \geq \sum_{i=h}^{k+h} \tau(i, k+d).$$

The base case $d = 0$ is trivial. For the inductive step, assume that we have proved the statement for d . So the inductive hypothesis gives us the existence of an h such that

$$2^{-d} \sum_{i=0}^k \tau(i, k) \geq \sum_{i=h}^{k+h} \tau(i, k+d).$$

Because \mathcal{M} is truthful, the payment of an agent is exactly equal to the threshold bid, so each agent i is paid $\tau(i, k + d)$ in the auction on the set system (E_{k+d}, F_{k+d}) with the bids as given above. If agent i were to self-divide into two new agents, the new set system would be (E_{k+d+1}, F_{k+d+1}) , and the payment of agent i (who is now getting paid as two pseudo-agents i and $i + 1$) would be $\tau(i, k + d + 1) + \tau(i + 1, k + d + 1)$. Because \mathcal{M} was assumed to be false-name-proof, it is not in the agent's best interest to self-divide in such a way, i.e., $\tau(i, k + d) \geq \tau(i, k + d + 1) + \tau(i + 1, k + d + 1)$. Summing this inequality over all agents $i = h, \dots, h + k$, we obtain

$$\begin{aligned} \sum_{i=h}^{h+k} \tau(i, k + d) &\geq \sum_{i=h}^{h+k} (\tau(i, k + d + 1) + \tau(i + 1, k + d + 1)) \\ &= \sum_{i=h}^{h+k} \tau(i, k + d + 1) + \sum_{i=h+1}^{h+k+1} \tau(i, k + d + 1). \end{aligned}$$

Define $\ell = 0$ if $\sum_{i=h}^{h+k} \tau(i, k + d + 1) \leq \sum_{i=h+1}^{h+k+1} \tau(i, k + d + 1)$; otherwise, let $\ell = 1$. Then, the above inequality implies that

$$\sum_{i=h}^{h+k} \tau(i, k + d) \geq 2 \sum_{i=h+\ell}^{h+k+\ell} \tau(i, k + d + 1).$$

Finally, setting $h' := h + \ell$, we can combine this inequality with the induction hypothesis to obtain that

$$2^{-(d+1)} \sum_{i=0}^k \tau(i, k) \geq \sum_{i=h'}^{k+h'} \tau(i, k + d + 1),$$

which completes the inductive proof.

Applying this equation with $k = 0$, we obtain that for each $d \geq 0$, there exists an $h \leq d$ such that $\tau(h, d) \leq 2^{-d} \cdot \tau(0, 0)$. Thus, in the set system (E_d, F_d) , if all infinity bidders have cost ∞ , agent h has cost just above $2^{-d} \tau(0, 0)$, and all other agents have cost 0, then agent h must be in the winning set, and must be paid at least 1. But it is easy to see that in this case, $\nu(c) = 2^{-d} \tau(0, 0)$, and the frugality ratio is thus at least $2^d / \tau(0, 0) = \Omega(2^d)$ (since $\tau(0, 0)$ is a constant independent of d). Finally, $|E_d| = |Z| + |I| + d + 1$, and because Z and I are constant for our class of examples, the frugality ratio is $2^{-(|Z|+|I|-1)} \cdot 2^n / \tau(0, 0) = \Omega(2^n)$. ■

4 An Additive Penalty Mechanism with Reserve Cost

We next propose another false-name-proof mechanism AP based on additive penalties and a reserve cost. The mechanism requires no assumption on whether agents have single or multiple elements in a set system, and we will prove that it is false-name-proof even when each agent has multiple elements. However, the AP does not always purchase a feasible set; it requires the auctioneer to decide on a *reserve cost*, and will only purchase a solution if there is a feasible solution whose cost (including penalties) does not exceed the reserve cost.

We can interpret the reserve cost as an upper bound on the cost (including penalties) the auctioneer is willing to pay. This is particularly reasonable if we assume that the auctioneer already has a way of performing the task using a single agent of cost r , such as a direct path with the cost r in a network. If the bids by agents are such that the auctioneer chooses this alternative, then none of the agents (including the auctioneer) receives positive utility. Clearly, the right choice of the reserve cost r will be crucial for the performance of the mechanism.

4.1 The AP mechanism

The AP mechanism is based on adding to the declared costs of the agents a penalty growing in the number of agents participating in a solution. For any set $S \in \mathcal{F}$, let $w(S)$ denote the number of (pseudo-)agents owning one or more elements of S . We will call $w(S)$ the *width* of the set S ; notice that we are not referring to the number of elements in S . The width-based *penalty* for a set S of width w is $D_r(w) = \frac{2^w - 1}{2^{w-1}} \cdot r$. Based on the actual costs and the penalty, we define the *adjusted cost* of a set S to be $\beta(S) = b(S) + D_r(w(S))$.

The AP mechanism first determines the set S^* minimizing the adjusted cost $\beta(S)$, among all feasible sets $S \in \mathcal{F}$. If its adjusted cost exceeds the reserve cost r , then the AP does not purchase any set, and does not pay any

agents. Otherwise, it chooses S^* , and pays each winning agent her threshold bid with respect to $\beta(S)$. That is, the payments are

$$p_i = \begin{cases} \min(r, \beta(S^{-i})) - (b(S^* \setminus A^i) + D_r(w(S^*))), & \text{if } \beta(S^*) \leq r \text{ and } S^* \cap A^i \neq \emptyset, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

where S^{-i} denotes the best solution with respect to $\beta(S)$ such that S^{-i} contains no elements from A^i . Notice that the set S^* selected by the AP will frequently differ from that selected by VCG, as the AP takes the number of agents in a solution into account.

Notice that if we assume the auctioneer requires an additional cost of $\frac{2^{w(S)}-1}{2^{w(S)}-1}r$ for handling a team S , then the AP mechanism is identical to the VCG mechanism with the reserve cost r , since the adjusted cost becomes the true total cost (including the additional cost of the auctioneer). Thus, if we assume that there exists no false-name manipulation, it is natural that the AP mechanism is incentive compatible since it is one instance of the VCG.

Example 9 Consider the example in Figure 1 below. Assume that the reserve cost is $r = 10$. If agent X does not split identifiers, the adjusted cost of the path $s-v-t$ is 2 (since it only involves one agent, the penalty is 0), and the adjusted cost of the edge $s-t$ is 8. Thus, the payment to agent X is 8.

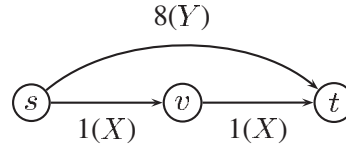


Figure 1: An example of the AP.

If agent X instead uses two different identifiers X' and X'' for the two edges, the penalty for the path $s-v-t$ is $10/2 = 5$. Thus, while the path still wins, the payment to each of X' and X'' is now $8 - (1 + 5) = 2$, so the total payment to agent X via pseudo-agents is 4. In particular, agent X has no incentive to split identifiers in this case.

4.2 Analysis of AP

In this section, we prove that simply submitting the pair (b_e, i) for each element $e \in A^i$ is a dominant strategy for each agent i under the mechanism AP. Furthermore, we prove that the payments of AP mechanism never exceed r . As a first step, we prove that it never increases an agent's profit to engage in identifier splitting.

Lemma 10 Suppose that agent i owns elements A^i , and splits identifiers into i', i'' , with sets $A^{i'}, A^{i''}$, such that $A^{i'} \cup A^{i''} = A^i$. Then, the profit agent i obtains after splitting is no larger than that obtained before splitting.

Proof. Let $S'^* \in \mathcal{F}'$ denote the winning set after agent i split identifiers, and $S^* \in \mathcal{F}$ the winning set before the identifier split. Clearly, if i does not win at all after the split, i.e., $S'^* \cap A^i = \emptyset$, then i has no incentive to split identifiers. Otherwise, if i does win after the split, then i must also win before the split. For the split can only increase $D_r(w(S))$ for all sets S containing any of i 's elements, while not affecting $D_r(w(S))$ for other sets. We now distinguish two cases, based on whether the winning set changes with the split:

1. First, we consider the case when the winning set stays the same after the split, $S'^* = S^*$. Clearly, if only one of the new pseudo-agents i', i'' wins (say, i'), then the payment of i can only decrease, as $\beta(S^{-i'}) \leq \beta(S^{-i})$ (every feasible set not using elements from A^i also does not use elements from $A^{i'}$). So we may assume that both i' and i'' win, which means that the width of the winning set S'^* increases by 1. Let w denote the original width of S^* . For simplicity, we write $B^{-i} = \min(r, \beta(S^{-i}))$, and similarly for i' and i'' . Then, the payment to i before the split is

$$B^{-i} - (b(S^* \setminus A^i) + D_r(w)),$$

whereas the new payment after the split is

$$\begin{aligned} & B^{-i'} - (b(S^{t*} \setminus A^{i'}) + D_r(w+1)) + B^{-i''} - (b(S^{t*} \setminus A^{i''}) + D_r(w+1)) \\ &= B^{-i'} + B^{-i''} - 2b(S^{t*}) + b(S^{t*} \cap A^i) - 2D_r(w+1). \end{aligned}$$

Thus, the increase in payment by identifier splitting is

$$B^{-i'} + B^{-i''} - B^{-i} - b(S^{t*}) + D_r(w) - 2D_r(w+1) = B^{-i'} + B^{-i''} - B^{-i} - b(S^{t*}) - r$$

As argued above, we have that $B^{-i''} \leq B^{-i}$, and by definition of $B^{-i'}$, we also know that $B^{-i'} \leq r$. So the increase is bounded from above by

$$r + B^{-i} - B^{-i} - b(S^{t*}) - r = -b(S^{t*}) \leq 0.$$

Hence, identifier splitting can only lower the payment of agent i . Since the total cost incurred by agent i stays the same, this proves that there is no benefit in identifier splitting.

2. If the solution changes, $S^{t*} \neq S^*$, then we distinguish two cases: if $S^{t*} \cap A^{i'} = \emptyset$ (or, similarly, $S^{t*} \cap A^{i''} = \emptyset$), then agent i could have achieved the same (or a better) result by not splitting identifiers, and instead bidding ∞ on all elements $e \notin A^i \cap S^{t*}$. The winning set will stay the same, because $\beta(S^{t*})$ stays the same, and $\beta(S)$ can only increase for other sets S . The payments to agent i can only increase, because $B^{-i'} \leq B^{-i}$, and both the penalty and the bids of other elements in S^{t*} stay unchanged.

If S^{t*} contains elements from both $A^{i'}$ and $A^{i''}$, i.e., $S^{t*} \cap A^{i'} \neq \emptyset$ and $S^{t*} \cap A^{i''} \neq \emptyset$, then agent i can again increase payments by bidding ∞ on all elements $e \notin A^i \cap S^{t*}$. Now, S^{t*} will also be the winning set if in addition, i does not split identifiers (because the adjusted cost $\beta(S^{t*})$ decreases, while all other adjusted costs stay the same). But we already saw in the previous case that not splitting identifiers gives the same or higher payment, while the cost remains the same. Thus, splitting identifiers is dominated by not splitting for agent i .

So we proved that so long as an agent can submit bids of false cost instead, it is never a dominant strategy to split identifiers. ■

Lemma 10 can be extended naturally to deal with k -way identifier splitting. Notice that the proof also shows that the AP is false-name-proof against self-division. The reason is that the AP does not treat two elements in the winning solution belonging to the same agent any different from one element. Thus, exactly the same proof that showed that submitting different pseudo-agents for two elements is never beneficial to an agent also shows that submitting two different elements (owned by two pseudo-agents) instead of one element can never be beneficial.

Theorem 11 *For all classes of set systems susceptible to false-name manipulations, AP is false-name-proof. That is, for each agent i , submitting bids (c_e, i) for each element $e \in A^i$ is a dominant strategy.*

Proof. By Lemma 10, we can assume without loss of generality that no agent will self-divide or split identifiers. Thus, each agent i submits bids (b_e, i) for all elements $e \in A^i$. If the set $S^* \in \mathcal{F}$ wins under the AP, agent i 's utility is

$$\begin{aligned} p_i - c(S^* \cap A^i) &= B^{-i} - (b(S^* \setminus A^i) + D_r(w(S^*))) - c(S^* \cap A^i) \\ &= B^{-i} - (b(S^* \setminus A^i) + D_r(w(S^*)) + c(S^* \cap A^i)). \end{aligned}$$

Since B^{-i} is a constant independent of the bids $b(e)$ by agent i , agent i 's utility is maximized when $(b(S^* \setminus A^i) + D_r(w(S^*)) + c(S^* \cap A^i))$ is minimized. But this is exactly the quantity that the AP will minimize when agent i submits truthful bids for all its elements; hence, truthfulness is a dominant strategy. Taken together, we have proved that the AP is false-name-proof against false-name manipulations. ■

The next theorem proves that an auctioneer with a reserve cost of r faces no loss.

Theorem 12 *An auctioneer with a reserve cost of r faces no loss. The sum of the payments made by the AP to agents never exceeds r .*

Proof. Because we already proved that the AP is false-name-proof, we can without loss of generality identify $c(e)$ and $b(e)$ for each element e . When w agents are part of the winning set S^* , the payment to agent i is

$$p_i = B^{-i} - (c(S^* \setminus A^i) + D_r(w)) \leq r - (c(S^* \setminus A^i) + r - \frac{r}{2^{w-1}}) = \frac{r}{2^{w-1}}$$

Thus, the sum of all payments to agents i is at most $w \cdot \frac{r}{2^{w-1}} \leq r$. ■

Remark 13 *Since the reserve cost mechanism does not always purchase a feasible set, we cannot analyze its frugality ratio in the sense of Definition 6. (The definition is based on the assumption that the mechanism always purchases a set.) Nevertheless, if the auctioneer already has a way of performing the task using a single agent of cost r , (such as a direct edge with higher cost in a network), we can derive bounds on the frugality ratio of AP mechanism. These bounds cannot be taken as actual hard guarantees, since we need to assume that the auctioneer was “lucky” in choosing the right reserve cost.*

Specifically, assume that the auctioneer chose a reserve cost $r \leq n2^n \cdot \max_{e \in S} c(T_e)$, where S is the cheapest solution, and the sets T_e are defined by the third constraint of Definition 5. Since the total payment of AP does not exceed r by Theorem 12, and $\nu(c) \geq \max_{e \in S} c(T_e)$ by Inequality (1), we obtain an upper bound of $O(n2^n)$ on the frugality ratio, matching that of the MP mechanism. More generally, if the auctioneer chooses an $r \leq f(n) \cdot \max_{e \in S} c(T_e)$, then the frugality ratio of the mechanism is $O(f(n))$.

5 Experiments

Since we cannot fully characterize the frugality ratio of AP mechanism analytically, we complement the analysis of the previous section with experiments for shortest s - t path auctions on random graphs. Our simulation compares the payments of AP mechanism with VCG, under the assumption that there is in fact no false-name manipulation and each agent owns one edge. Thus, we evaluate the overpayment caused by preventing false-name manipulation.

Since some of our graphs have monopolies, we modify VCG by introducing a reserve cost r . Thus, if S^* is the cheapest solution with respect to the cost, the reserve-cost VCG mechanism (RVCG) only purchases a path when $c(S^*) \leq r$. In that case, the payment to each edge $e \in S^*$ is $p_e = \min(r, c(S^{-e})) - c(S^* \setminus \{e\})$, where S^{-e} is the cheapest solution not containing e .

Our generation process for random graphs is as follows: 40 nodes are placed independently and uniformly at random in the unit square $[0, 1]^2$. Then, 200 independent and uniformly random node pairs are connected with edges.⁴ The cost of each edge e is its Euclidean length. We evaluate 100 random trials; in each, we seek to buy a path between two randomly chosen nodes. While the number of nodes is rather small compared to the real-world networks on which one would like to run auctions, it is dictated by the computational complexity of the mechanisms we study. Larger-scale experiments are a fruitful direction for future work.

Figure 2 shows the average social surplus (the difference between the reserve cost and the true cost incurred by edges on the chosen path, $r - \sum_{e \in S^*} c_e$) in the AP and RVCG, as well as the ratio between the two, when varying the reserve cost $r \in [0, 3.5]$. The social surplus for both increases roughly linearly under both mechanisms. While the plot shows that some efficiency is lost by using the AP, it is always within a factor of about 60% for our instances, and on average around 80%.

Figure 3 illustrates the average payments of the auctioneer. Clearly, small reserve costs lead to small payments, and when the reserve costs are less than 1.8, the payment of AP is in fact smaller than that of RVCG. As the reserve

⁴We also ran simulations on random small-world networks [32]. Many real-world networks in which routes must be purchased, such as truck routes, railroad tracks, natural gas pipeline networks, or computer networks, are known to be small-world networks. Our results for small-world networks are qualitatively similar, and we therefore focus on the case of uniformly random networks here.

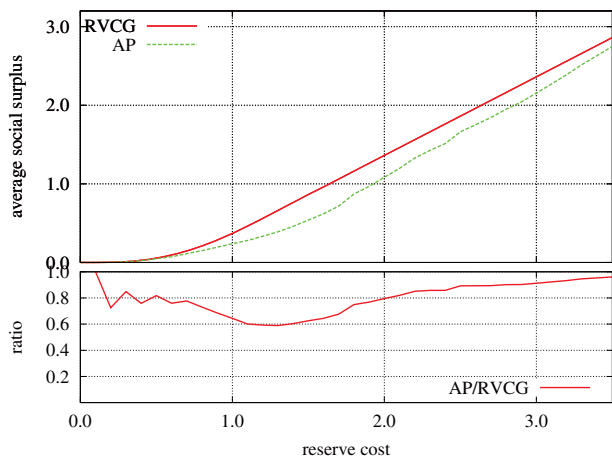


Figure 2: The evaluation results of social surplus.

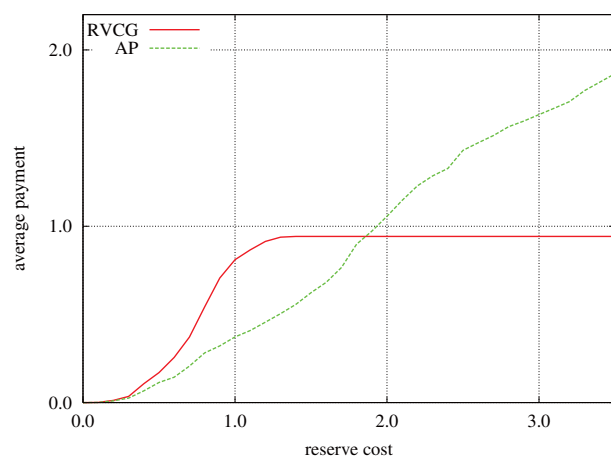


Figure 3: The evaluation results of payments.

cost r increases, RVCG’s payments converge, while those of AP keep increasing almost linearly. The reason is that the winning path in AP tends to have fewer edges than other competing paths, and is thus paid an increased bonus as r increases. We would expect such behavior to subside as there are more competing paths with the same number of edges.

6 Conclusions

In this paper, we initiated the investigation of false-name-proof mechanisms for hiring a team of agents. In this model, the structure of the set system may not be completely known to the auctioneer. We first presented a mechanism MP based on exponential multiplicative penalties, which always buys a solution, but is false-name-proof only when each agent has exactly one element. We proved that MP has a frugality ratio of $O(n2^n)$. This is within a factor of n of optimal for all classes of set systems, as we also proved a lower bound of $\Omega(2^n)$ for all false-name-proof mechanisms.

We also presented an alternate mechanism AP with exponential additive penalties and a reserve cost, which is false-name-proof even when each agent has multiple elements. We evaluated the AP experimentally; while it has smaller social surplus compared to VCG, the difference is bounded by small multiplicative constants in all of our experiments. The payments of the AP mechanism is smaller than the VCG mechanism when the reserve cost is small. Although the payments increase linearly in the reserve cost, they never exceed the reserve cost.

Many interesting open questions remain. Most importantly, it is open to identify a mechanism which always purchases a solution, and is false-name-proof even when each agent has multiple elements. This holds even for such seemingly simple cases as s - t path auctions. It may be possible that no such mechanism exists, which would be an interesting result in its own right. The difficulty of designing false-name-proof mechanisms for hiring a team is mainly due to a lack of useful characterization results for incentive-compatible mechanisms when agents have multiple parameters. While a characterization of truthful mechanisms has been given by Rochet [25], this condition is difficult to apply in practice. Only recently did Lavi and Swamy [17] present incentive compatible mechanisms for scheduling on machines based on the condition of Rochet.

It would also be desirable to get the bounds in Section 3 to match asymptotically, i.e., to either remove the factor n from the upper bound, or tighten the lower bound accordingly. The latter may be difficult, as it is likely at least as difficult as designing a truthful mechanism for all set systems with frugality ratio within a constant factor of optimum. Thus, even progress on this question for specific classes of set systems would be desirable.

Acknowledgments

We would like to thank several anonymous reviewers for helpful feedback on a previous version of this paper.

References

- [1] E. Anshelevich, A. Dasgupta, J. Kleinberg, E. Tardos, T. Wexler, and T. Roughgarden. The price of stability for network design with fair cost allocation. In *Proc. 45th IEEE Symp. on Foundations of Computer Science*, 2004.
- [2] A. Archer and E. Tardos. Frugal path mechanisms. In *Proc. 13th ACM Symp. on Discrete Algorithms*, pages 991–999. ACM/SIAM, 2002.
- [3] M. Babaioff, R. Lavi, and E. Pavlov. Mechanism design for single-value domains. In *Proc. 20th AAAI*, pages 241–247, 2005.
- [4] S. Bikhchandani, S. de Vries, J. Schummer, and R. Vohra. Linear programming and vickrey auctions. *IMA Volume in Mathematics and its Applications, Mathematics of the Internet: E-auction and Markets*, 127:75–116, 2001.
- [5] E. Clarke. Multipart pricing of public goods. *Public Choice*, 11:17–33, 1971.
- [6] A. Czumaj and A. Ronen. On the expected payment of mechanisms for task allocation. In *Proc. 23rd ACM Symp. on Principles of Distributed Computing*, 2004.
- [7] Y. Du, R. Sami, and Y. Shi. Path Auction Games When an Agent Can Own Multiple Edges. In *Proc. 1st Workshop on the Economics of Networked Systems (NetEcon06)*, pages 48–55, 2006.
- [8] E. Elkind, A. Sahai, and K. Steiglitz. Frugality in path auctions. In *Proc. 15th ACM Symp. on Discrete Algorithms*. ACM/SIAM, 2004.
- [9] J. Feigenbaum, C. Papadimitriou, R. Sami, and S. Shenker. A BGP-based mechanism for lowest-cost routing. In *Proc. 21st ACM Symp. on Principles of Distributed Computing*, 2002.
- [10] R. Garg, V. Kumar, A. Rudra, and A. Verma. Coalitional games on graphs: core structures, substitutes and frugality. Technical Report TR-02-60, UTCS, 2002.
- [11] T. Groves. Incentives in teams. *Econometrica*, 41:617–631, 1973.
- [12] N. Immorlica, D. Karger, E. Nikolova, and R. Sami. First-price path auctions. In *Proc. 7th ACM Conf. on Electronic Commerce*, 2005.
- [13] A. Iwasaki, M. Yokoo, and K. Terada. A Robust Open Ascending-price Multi-unit Auction Protocol against False-name bids. *Decision Support Systems*, 39(1):23–39, March 2005.
- [14] A. Karlin, D. Kempe, and T. Tamir. Beyond VCG: Frugality of truthful mechanisms. In *Proc. 46th IEEE Symp. on Foundations of Computer Science*, 2005.
- [15] P. Klemperer. Auction theory: A guide to the literature. *Journal of Economic Surveys*, 13:227–286, 1999.
- [16] V. Krishna. *Auction Theory*. Academic Press, 2002.
- [17] R. Lavi and C. Swamy. Truthful mechanism design for multi-dimensional scheduling via cycle monotonicity. In *Proc. 8th ACM Conference on Electronic Commerce*, pages 252–261, 2007.
- [18] A. Lazar, A. Orda, and D. Pendarakis. Virtual path bandwidth allocation in multi-user networks. In *Proc. 14th IEEE INFOCOM Conference*, 1995.
- [19] A. Mas-Collel, W. Whinston, and J. Green. *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, 1995.

- [20] N. Nisan. Algorithms for selfish agents: Mechanism design for distributed computation. In *Proc. 17th Annual Symp. on Theoretical Aspects of Computer Science*, 1999.
- [21] N. Nisan, S. London, O. Regev, and N. Carmiel. Globally distributed computation over the internet - the popcorn project. In *Proc. 18th International Conference on Distributed Computing Systems*, 1998.
- [22] N. Nisan and A. Ronen. Algorithmic mechanism design. In *Proc. 31st ACM Symp. on Theory of Computing*, pages 129–140. ACM Press, 1999.
- [23] D. O’Neill, D. Julian, M. Chiang, and S. Boyd. QoS and fairness constrained convex optimization of resource allocation for wireless, cellular and ad hoc networks. In *Proc. 21st IEEE INFOCOM Conference*, 2002.
- [24] C. Papadimitriou. Algorithms, games and the internet. In *Proc. 33rd ACM Symp. on Theory of Computing*, pages 749–752. ACM Press, 2001.
- [25] J. C. Rochet. A necessary and sufficient condition for rationalizability in a quasilinear context. *Journal of Mathematical Economics*, 16:191–200, 1987.
- [26] T. Roughgarden and E. Tardos. How bad is selfish routing? In *Proc. 41st IEEE Symp. on Foundations of Computer Science*, 2000.
- [27] V. Smith, P. Crampton, Y. Shoham, and R. Steinberg, editors. *Combinatorial Auctions*. MIT Press, 2006.
- [28] T. Suyama and M. Yokoo. Strategy/false-name proof protocols for combinatorial multi-attribute procurement auction. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 11(1):7–21, 2005.
- [29] T. Suyama and M. Yokoo. Strategy/false-name proof protocols for combinatorial multi-attribute procurement auction: Handling arbitrary utility of the buyer. In *Proceedings of the First Workshop on Internet and Network Economics (WINE-2005)*, 2005.
- [30] K. Talwar. The price of truth: Frugality in truthful mechanisms. In *Proc. 21st Annual Symp. on Theoretical Aspects of Computer Science*, 2003.
- [31] W. Vickrey. Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders. *J. of Finance*, 16:8–37, 1961.
- [32] D. J. Watts and S. H. Strogatz. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393(6684):440–442, June 1998.
- [33] M. Yokoo. The characterization of strategy/false-name proof combinatorial auction protocols: Price-oriented, rationing-free protocol. In *Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 733–739, 2003.
- [34] M. Yokoo, Y. Sakurai, and S. Matsubara. Robust Combinatorial Auction Protocol against False-name Bids. *Artificial Intelligence*, 130(2):167–181, 2001.
- [35] M. Yokoo, Y. Sakurai, and S. Matsubara. The effect of false-name bids in combinatorial auctions: New fraud in Internet auctions. *Games and Economic Behavior*, 46(1):174–188, 2004.

多市場接触環境において相互協力を達成する戦略について

小川一仁(大阪産業大学) 川村哲也(京都大学) 菊谷達弥(京都大学) 小田宗兵衛(京都産業大学)
連絡先: kz-ogawa@eco.osaka-sandai.ac.jp

多市場接触(multi-game contact, multimarket contact)は(主に2)主体が同じ相手と複数の場面で同時に継続して接触することである。例えば、ソニーと任天堂は据置型ゲーム機市場と携帯型ゲーム機市場で対峙していると言えるが、他にも、職場とプライベートでの労働者間の人間関係、外交における政治問題と経済問題の関係が多市場接触としてあげられる。

我々はこのような状況を実験環境で再現し、実際に人間がどのような振る舞いをするか検討した。多市場接触には、繰り返しゲームを基礎とした理論が存在している。そこでは複数のゲームをうまく組み合わせることで、1つのゲームを繰り返しプレイするときよりも割引因子が低下し、協力しやすくなることが分かっている。しかし、繰り返しゲームを基礎としているので、分析する際にトリガー戦略に依拠している。トリガー戦略の有用性は認めるとしても、実際に多市場接触下で人間が協力関係を築くときにどのような戦略を採用するかはブラックボックスのままである。

そこで、我々はこのような状況を実験環境で再現し、実際に人間がどのような振る舞いをするか検討した。実験では、ペアを固定し、被験者に終了回数を知らせず実験を行った。実験は少なくとも80ラウンド継続し、多市場接触下での協力率はどうか、協力達成のための方策はどのようなものか検討した。

得られた知見は以下のようなものである。

1. 理論通りにゲームを組み合わせたが、協力しやすくなるはならなかった(ゲームを1つだけプレイする方が有意に協力しやすかった)。しかし、異なる多市場接触環境の比較で、協力しやすいゲームを組み合わせると協力率が有意に増加することも分かった。多市場接触ではプレイヤーが選択できる選択肢が増加するため、意思決定が複雑になる。それが現実の協力しやすさには大きな影響力を持つことが分かった。

2. そのような複雑な状況でペアが協力関係を継続させたときに採用していたのは、我々が Soft-TFT と名付けた戦略を中心に採用していたプレイヤーであった。Soft-TFT はペアが直前ラウンドで全てのゲームで裏切らない限り、全てのゲームで協力を出し続ける戦略である。この戦略はペアから搾取される可能性があるが、そうなった場合には Soft-TFT から一瞬だけ逸脱して、対戦相手に対して制裁を加える反応を行うことで対処していた。このようにしてプレイヤーは協力可能性を高めていたのである。このほかにも Hard-TFT を採用したプレイヤーの一部も協力関係を成立させていた。Hard-TFT は直前ラウンドでペアが全てのゲームで協力しない限り全てのゲームで裏切るといふ、厳しいTFTである。この戦略を採用するプレイヤーはHard-TFT の厳しさ故に相互協力を達成する機会を逸する可能性がある。そのようなときに、プレイヤーは全てのゲームで裏切りを提示し合う状況を打開するために、Hard-TFT から一瞬だけ逸脱して、対戦相手に対して全てのゲームで協力すると言った寛容な行動をとり、協力を誘発しようとしていた。

このような意思決定は、複雑な状況を（認知的に）簡単にするための意思決定の1つであると考えられる。なぜなら、これらの戦略は全てのゲームで裏切りか、協力しか提出しないからである。1つのゲームで協力するが、もう一つのゲームでは裏切る、といったややこしいことをしない。プレイヤーは状況を簡単なものにして、そこから（失敗するかもしれませんが）相互協力関係を導こうとする。

さらに、これらは社会心理学（Goal Expectation Theory）や政治心理学（GRIT Graduated Reciprocation in Tension Reduction strategy）の概念と非常に近いことが示唆される。前者は繰り返してPD ゲームを行うときに、相互協力状態に達するための条件を理論づけたものである。この理論は、しかし、複数のゲームを同時に行う場合には対応していない。多市場接触下で相互協力を達成するためには、我々が実験を通じて見出した一連のTFT戦略が鍵になるかもしれない。

後者はオズグッドによって提案された戦略である。2主体の間にある緊張関係を緩和するためにとられうる方策で、相手が同じことをしてくれるだろうという期待感を持って一方的に協力を提示することを指す。オズグッドはこの戦略が相互協力にとって有益であると考えた。この戦略はゲーム理論が十分発展する以前に考案されたものなので、ゲーム理論との関係は明示的ではない。しかし、政治交渉の世界がマルチイシューであることを考慮するならば、我々がここで提示した一連のTFTが相互協力を導く実践的な戦略であると解釈できよう。

第 3 部
経済実験と経済学教育

目次

第1章	はじめに	3
第2章	競争市場実験1	5
2.1	タケノコ市場実験インストラクション	5
2.2	タケノコ市場実験 試験と資料	9
2.3	解説	11
第3章	競争市場実験2	13
3.1	マグロ市場実験インストラクション	13
3.2	マグロ市場 試験と資料	17
3.3	解説	19
第4章	競争市場実験3	21
4.1	ダブルオークション実験インストラクション	21
4.2	ダブルオークション実験 試験と資料	28
4.3	解説	30
第5章	複占市場実験1	31
5.1	複占市場実験1 インストラクション	31
5.2	解説	34
5.3	利得表	34
第6章	複占市場実験2	37
6.1	複占市場実験2 インストラクション	37
6.2	解説	40
第7章	複占市場実験3	41
7.1	複占市場実験3 インストラクション	41
7.2	解説	44
7.3	クールノーモデル利得表	44

第8章 複占市場実験4	47
8.1 複占市場実験4 インストラクション	47
8.2 解説	50

教室実験

灰谷綾平

2009年3月

第1章 はじめに

京都産業大学大学院経済学研究科は、2006年度から2008年度まで、私立大学学術研究高度化推進事業（オープン・リサーチ・センター整備事業）として『経済実験による研究と教育：実験から誰が何を学ぶか』を実施した。この事業は実験経済学研究の推進と人材育成を目指すものであったが、プロジェクト名『実験から誰が何を学ぶか』が示すように、実験による経済学教育の開発と効果の測定も目標のひとつであった。本資料は、この活動の一環として実施された大教室実験を解説する。

実験は、小田宗兵衛教授の指導のもとで灰谷綾平が実施した。実験は、同教授の担当する京都産業大学経済学部2年生配当科目『ミクロ経済学A』（春学期）および『ミクロ経済学B』（秋学期）の授業の一環として、授業中に行われた。

本資料は、論文ではなく資料であり、各実験で使われた印刷物を示し、実験を理解するための最小限の解説を付す。具体的には、実験ごとに一つの章をあて、各章を3つの節に分けて実験を説明する。すなわち、各章の第1節ではその実験の実験説明書を、第2節ではその実験の試験配布物を、第3節ではその実験の解説を示す。実験説明書は、実験の直前に学生たちに配られるもので、実験の手順と各人の目指すべきことを説明する。試験配布物は、実験の次の授業（通常一週間後）で学生に配布されるもので、実験結果を説明する資料とそれについての問題からなる。解説は、実験の背後の理論や目的についての説明である。ただし、各実験がどのように体系づけられているか、学生たちは各実験でどの行動し何を学んだかなどについての総合的分析は、現在執筆中の共著論文（灰谷・小田）に譲り、本資料の解説は必要最低限のものにとどめる。

第2章 競争市場実験1

2.1 タケノコ市場実験インストラクション

手元に説明書（この用紙）、記録用紙、黄色、または青色の付箋紙が5枚あることを確認して下さい。（何かひとつでも不足するものがあれば、手を上げて知らせて下さい。）確認したら、すべての付箋紙の上半分に自分の名前を記入して下さい。

黄色の付箋を持っている人

黄色の付箋紙を持っている人は、農家でタケノコの売り手です。惣菜屋とタケノコの取引を結んでから（つまり売れてから）毎回配布される「費用カード」の費用でタケノコを掘ることができます。この費用より高い値段で売れば、タケノコを掘って差額があなたの利益になります。一つも売らなければ、タケノコを掘らないので、費用も売り上げも無く、あなたの利益は0です。

青色の付箋を持っている人

青の付箋紙を持っている人は、惣菜屋でタケノコの買い手です。タケノコを買って惣菜を作り販売すれば毎回配布される「売上カード」の売上をあげられます。この売上より安い値段でタケノコを買えば、差額があなたの利益になります。一つも買わなければ、あなたの利益は0です

取引の流れ

次のような手順で5回取引を行います。

1. 農家に「費用カード」が、惣菜屋に「売上カード」が配られます。カードの数字が、その回のあなたの費用または売上です。この数字をしっかりと記憶して下さい。
2. 黄色の付箋紙はタケノコを、青い付箋紙は小切手（お金）を表します。取引をする際は、黄色または青色の付箋紙を胸に一枚貼り付けて下さい。

3. 売り手、買い手ともに取引開始の合図で、出来るだけ大きい利益が出るように、取引相手を探して売買して下さい。
4. あなたと相手がともに取引価格で納得して売買成立したら、自分の付箋に成立した取引価格を記入して取引相手と交換して下さい。この時、受け取った付箋に成立した取引価格が記入してあるかどうかを確認して下さい。交渉がうまくいかなかった場合、実験者の合図があるまで他の取引相手を探して黒字になるように交渉して下さい。
5. 取引が成立した買い手は、席に戻って取引結果を記録用紙にまとめます。取引が成立した売り手は実験者に取引成立価格を報告して下さい。

取引できた売り手 取引価格欄には取引価格を、費用カード欄には実験者からもらったカードの数字を、利益欄には取引価格から費用カード額を引いた数字を記入して下さい。一番下の欄は、取引が成立したときに受け取った青色の付箋を貼り付けて下さい。

取引できなかった売り手 取引価格欄には0を、費用カード欄には実験者からもらったカードの数字を、利益欄には0を記入して下さい。一番下の欄は、胸に着けていた自分の付箋を貼り付けて下さい。

取引できた買い手 売上カード欄には実験者からもらったカードの数字を、取引価格欄には取引価格を、利益欄には売上カード額から取引価格を引いた数字を記入して下さい。一番下の欄は、取引が成立したときに受け取った黄色の付箋を貼り付けて下さい。

取引できなかった買い手 売上カード欄には実験者からもらったカードの数字を、取引価格欄には0を、利益欄にも0と記入して下さい。一番下の欄は、胸に着けていた自分の付箋を貼り付けて下さい。

以下のことに注意して下さい

- 取引は1回の取引につき、タケノコ1本を1人の売り手、又は買い手と取引して下さい。団体交渉をしたり、1回の実験で1本以上のタケノコを取引しないで下さい。
- 1回の取引が終了する度に、売上カードと費用カードは回収され配りなおされます。
- 売り手（農家）は取引価格の報告に来て下さい。買い手（惣菜屋）は報告に来ないで下さい。報告された取引価格はどんどん公開していきます。
- 取引相手の示す価格に満足できなければ、どんどん相手を代えて1円でも利益を大きくするようにして下さい。しかし損失は出さないようにして下さい。

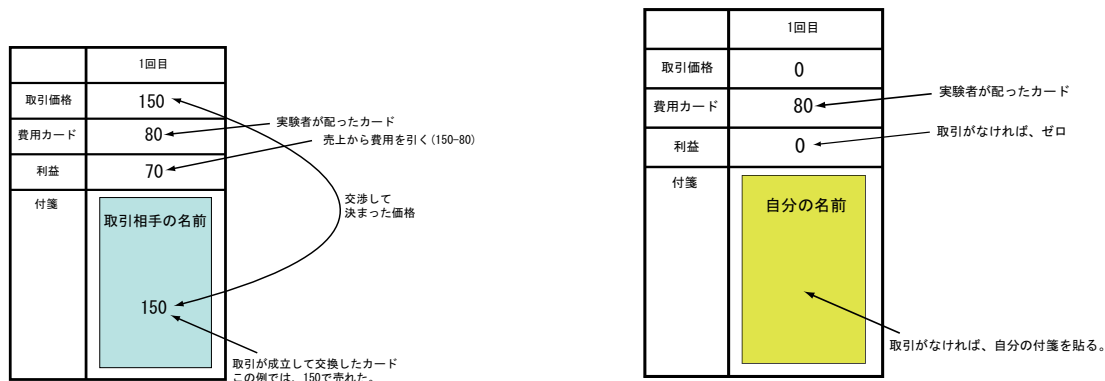


図 2.1: 取引できた売り手の記録用紙の書き方 図 2.2: 取引できなかった売り手の記録用紙の書き方

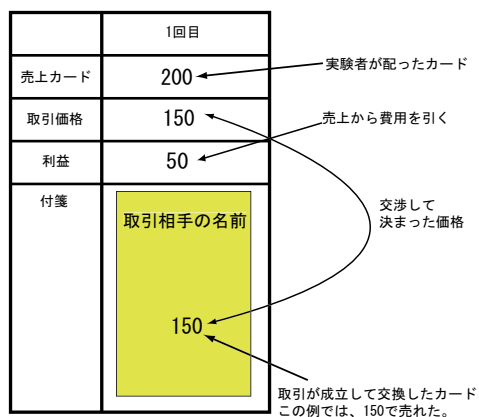


図 2.4: 取引できなかった買い手の記録用紙の書き方

- 取引結果を成績に反映することはありません。取引が不成立であったり利益が少なくても結果を正しく記入または報告して下さい。

2.2 タケノコ市場実験 試験と資料

表1は前回の実験で配布された費用カードと売上カードの一覧、表2は成立価格の集計結果、表3全ての成立価格の一覧です。

問1 市場需要曲線を描いて下さい。

問2 市場供給曲線を描いて下さい。

問3 問1、問2で描いた市場需要曲線と供給曲線及び実験資料を使って実験結果を分析して下さい。。

表 2.1: 費用カードと売上カードの配布枚数表)

売り手		買い手	
売上カード	人数	費用カード	人数
200円	13名	70円	17名
140円	14名	100円	6名
90円	14名	180円	18名
60円	14名	240円	12名
合計	55	合計	53

表 2.2: 取引結果集計

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
最高価格	240	200	210	210	200
上位 25%	165	160	160	150	160
平均価格	134.0	136.2	140.2	131.5	138.9
下位 25%	100	110	100	110	130
最小価格	60	65	90	60	69
取引数量	35	37	33	35	35

上位 25%と下位 25%の数値間に成立価格の 50%が含まれます。

表 2.3: 全ての取引結果一覧 (取引が報告された順番に従って表示しています。)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
1	160	200	160	210	140
2	150	150	120	200	130
3	200	180	120	120	130
4	100	150	130	140	150
5	150	150	205	120	150
6	180	180	160	90	120
7	160	150	160	160	180
8	150	170	160	160	190
9	200	200	100	150	90
10	150	170	200	140	160
11	61	160	200	150	150
12	150	110	90	115	170
13	240	120	160	170	200
14	150	160	130	90	150
15	150	90	120	120	160
16	180	150	100	110	69
17	165	160	100	120	125
18	100	150	180	130	140
19	150	150	160	205	160
20	180	130	160	140	155
21	160	65	130	150	140
22	100	165	150	145	120
23	70	150	140	170	150
24	100	100	130	120	110
25	150	150	90	150	130
26	150	140	120	150	170
27	150	150	100	100	90
28	130	70	200	90	140
29	200	140	150	150	130
30	90	100	210	60	140
31	180	160	90	150	140
32	100	80	100	140	150
33	80	110	100	100	150
34	60	70		100	120
35	160	90		70	95
36		120			
37		100			

2.3 解説

各人が一回の市場で取引できる商品の数はたかだか1個という設定で、ピット・マーケット実験をおこなった。具体的には、学生たちを同数の売手と買手に分け、各人に各人の費用または指定価格を私的情報として伝えた（具体的には、売手には費用カードを、買手には指定価格カードを配った）。そして「取引は売手と買手が取引価格で合意したときに成立し、それにより売手は価格マイナス費用の利益を、買手は指定価格マイナス価格の余剰を得ること」と「生産者は生産した商品を売るのではなく売れた商品を作る設定だから、生産者は自分の生産費以上の価格で買う買い手が見つからなければ、マイナスの利益を出すのではなく生産を行わず利益0で市場を終えること」を説明し、市場（京都産業大学の野外劇場「神山コロシウム」）を自由に動いて取引相手を見つけて取引をすることを求めた。実験はカードの設定を変えずに4回繰り返し行われた。

翌週の授業で参加者たちに実験についても試験を行った。学生に実験の結果と売り手費用と買手指定価格分布を与えた。試験の問題は、いずれも実験資料から実験の市場供給曲線と市場需要曲線を描かせるものであった。

第3章 競争市場実験2

3.1 マグロ市場実験インストラクション

確認事項：手元に説明書（この用紙）、記録用紙、黄色または青の付箋紙が6枚あることを確認してください。確認したら付箋紙の上半分に自分の名前を書いてください。

共通事項：実験は、規則を変えて合計6回おこなわれます。毎回の実験は売手カードと買手カードの配布から始まります。

青色の付箋を持っている人

青の付箋紙を持っている人は寿司屋です。青色の付箋紙は小切手を表します。マグロを買って寿司を作り販売すれば毎回配布される「売上カード」の売上をあげられます。この売上より安い値段でマグロを買えば、差額があなたの利益になります。

黄色の付箋を持っている人

黄色の付箋紙を持っている人は漁師でマグロの売手です。黄色の付箋紙はマグロの販売予約の証明を表します。毎回配布される「費用カード」の費用で船を借りて燃料を買えば漁に出られます。出漁すれば必ずマグロを一本釣ることができます。この費用より高い値段で売れば、差額があなたの利益になります。

実験前半の規則

前半の3回では漁師はまず寿司屋と取引をし、次に船を借りそれから出漁します。つまり漁師は寿司屋と売買契約を結んでから（どの寿司屋にいくらでマグロを売るかを決めてから）船を借りて出漁します。寿司屋は契約した漁師からマグロを契約の値段で買います。

漁師と寿司屋が取引価格で合意すれば取引は成立です。取引が成立したら漁師と寿司屋は合意した価格をそれぞれの付箋紙に記入して付箋紙を交換してください。

取引できた漁師 取引価格欄には取引価格を、費用カード欄には実験者からもらったカードの数字を、利益欄には取引価格から費用カード額を引いた数字を記入して下さい。一番下の欄は、取引が成立したときに受け取った青色の付箋を貼り付けて下さい。(図3.1)

取引できなかった漁師 取引価格欄には0を、費用カード欄には実験者からもらったカードの数字を、利益欄には0を記入して下さい。一番下の欄は、自分の付箋を貼り付けて下さい。(図3.2) 取引が成立した寿司屋は実験者に成立価格を報告して下さい。

取引できた寿司屋 売上カード欄には実験者からもらったカードの数字を、取引価格欄には取引価格を、利益欄には売上カードの数値から取引価格を引いた数字を記入して下さい。一番下の欄は取引が成立したときに受け取った黄色の付箋を貼り付けて下さい。(図 3.3)

取引できなかった寿司屋 売上カード欄には実験者からもらったカードの数字を、取引価格欄には0を、利益欄にも0と記入して下さい。一番下の欄は、胸に着けていた自分の付箋を貼り付けて下さい。(図 3.4)

	項目
取引価格	150
売上カード	90
利益	70
付箋	取引相手の名前 150

	項目
取引価格	—
売上カード	30
利益	—
付箋	自分の名前 不成立

図 3.1: 取引できた漁師の記録用紙の書き方 (前 図 3.2: 取引できなかった漁師の記録用紙の書き方 (前半実験))

	項目
売上カード	90
取引価格	150
利益	50
付箋	取引相手の名前 150

	項目
売上カード	30
取引価格	—
利益	—
付箋	自分の名前 不成立

図 3.3: 取引できた寿司屋の記録用紙の書き方 図 3.4: 取引できなかった寿司屋の記録用紙の書き方 (前半実験)

実験後半の規則

後半の3回では、漁師は全員船を借りる契約を既に結んでいます。いいかえれば漁師はマグロを取りに行かなくても、船の借賃を払わなければいけません。つまり取引が成立しないときの漁師の利益は、0ではなく借賃だけ赤字になります。借賃は売り手カードの半額とします。(例：売り手カードが80の場合は燃料費が40、借賃が40になります。)

実験結果を記入する際、前半の実験の相違点は、取引できなかった漁師のみです。取引価格欄には0を、費用カード欄には実験者からもらったカードの数字を、利益欄には実験者からもらったカードの数字の半額分を記入して下さい。一番下の欄は自分の付箋を貼り付けて下さい。(図3.6) 寿司屋の利益と取引が成立するときの漁師の利益は前半とまったく同じです。

	1回目
取引価格	150
費用カード	80
利益	70
付箋	取引相手の名前 150

	1回目
取引価格	—
費用カード	80
利益	-40
付箋	自分の名前 不成立

取引が成立なかった場合、費用カードの半額(80の借賃)が赤字となる。

図 3.5: 取引できた寿司屋の記録用紙の書き方 図 3.6: 取引できなかった寿司屋の記録用紙の書き方 (後半実験)

以下のことに注意して下さい

- 取引は1回の取引につき、マグロ1本を1人の漁師、又は寿司屋と取引して下さい。団体交渉をしたり、1回の実験で1本以上のマグロを取引しないで下さい。
- 毎回の実験ごとに、漁師は漁師どうして、売上カードを交換して下さい。同様に寿司屋は寿司屋どうして費用カードを交換して下さい。
- 寿司屋は取引価格の報告に来て下さい。漁師は報告に来ないで下さい。報告された取引価格はどんどん公開していきます。
- 取引結果が成績に反映することはありません。取引が不成立であったり利益が少なくても結果を正しく報告して下さい。

3.2 マグロ市場 試験と資料

表1は、前回の試験で配布された費用カードと売上カードの一覧、表2は成立価格の集計結果、表3は全ての成立価格の一覧です。

問1 試験前半の市場需要曲線と市場供給曲線を描いて下さい。

(原点、x軸、y軸、数値なども記入して下さい。)

問2 試験後半の市場供給曲線と市場供給曲線を描いて下さい。

(原点、x軸、y軸、数値なども記入して下さい。)

問3 問1で描いた試験前半の市場需要曲線と供給曲線、問2で描いた試験後半の市場需要曲線と供給曲線、および試験結果を使って今回の試験を分析して下さい。

表 3.1: 費用カードと売上カードの配布枚数表

売り手		買い手	
60円	14名	240円	14名
90円	6名	180円	14名
140円	20名	120円	7名
250円	5名	90円	14名

表 3.2: 取引結果集計：上位25%と下位25%の数値間に成立価格の50%が含まれます。

前半セッション				後半セッション			
	1回目	2回目	3回目		1回目	2回目	3回目
最大価格	200	200	230	最大価格	170	239	175
上位25%価格	150	150	160	上位25%価格	150	150	150
平均価格	137	135	136	平均価格	127	130	124
下位25%価格	110	100	100	下位25%価格	100	105	100
最低価格	80	80	80	最低価格	70	80	80

表 3.3: 全ての取引結果一覧 (取引が報告された順番に従って表示しています。)

前半セッション				後半セッション			
	1回目	2回目	3回目		1回目	2回目	3回目
1	140	100	100	1	150	150	150
2	170	100	170	2	175	90	120
3	200	200	160	3	100	100	150
4	200	140	100	4	130	110	200
5	150	170	150	5	170	110	100
6	110	120	230	6	100	110	150
7	150	110	100	7	150	155	110
8	170	150	100	8	170	170	110
9	80	150	170	9	150	110	150
10	150	150	140	10	150	105	90
11	130	80	100	11	90	105	130
12	150	100	150	12	100	120	150
13	110	110	150	13	120	239	120
14	160	180	100	14	70	178	150
15	120	100	140	15	170	100	100
16	150	160	140	16	150	150	120
17	110	150	100	17	100	160	110
18	150	155	160	18	150	145	150
19	95	150	150	19	80	150	90
20	80	150	120	20	120	110	110
21	150	100	150	21	150	120	130
22	150	150	100	22	130	150	175
23	160	120	150	23	150	110	145
24	150	140	80	24	100	160	100
25	150	80	160	25	130	140	110
26	110	150	150	26	110	150	100
27	150	140	140	27	85	150	120
28	150	110	120	28	150	140	150
29	150	150	175	29	150	100	135
30	150	140	160	30	170	100	80
31	150	150	140	31	120	100	100
32	80	150	110	32	150	80	80
33	100	170		33	80	110	110
34	80			34	90	150	120
35	155			35	110		90
				36	90		170
				37	110		
				38	170		

3.3 解説

第1回実験と同様のピット・マーケット実験を、ほぼ同じ学生たちに同じ環境（神山コロシウム）で6回おこなった。ただし、後半の市場では費用の半分は固定費とした。全ての売り手の費用の半額を固定費とみなし、取引が成立しなかった場合、売り手は固定費分の赤字となる。具体的には、売手は漁師で買手は寿司屋であり、前半（3回）は「売手は契約が成立したときだけ（ある売手にある金額で魚を売る約束をしたときだけ）、費用カードの金額を払って船を借りて燃料を買って漁に出る」という設定で、後半（3回）は「売手は既に船を借りているので、たとえ漁に出なくても費用カードの金額の半分以上を借賃として払う」という設定とした。

第4章 競争市場実験3

4.1 ダブルオークション実験インストラクション

いまから売手と買手に別れて売買します。コンピューターがあなたを売手か買手か決定します。

あなたが売手になれば…

以下の画面が示されます。ただし ～ の数字は説明のためのもので、実際には表示されません。

一番左の には、あなたが売手であることと、あなたの費用が示されています。図の例は、作らなくても費用が30円かかり、50円かければ1つ、150円かければ2つ、300円かければ3つ、450円かければ4つ作れることを示しています（いくら費用をかけても、5つ以上は作れません）。市場では売買の約束だけをします（以下では「売る（買う）」は「売る（買う）約束をする」の意味です）。ですから、あなたは市場で商品売ってから（市場が閉じてから）売った個数だけ商品を作って買手に引きわたします。たとえば、もしあなたが商品2つを90円と180円で売れば、あなたの売上は270円、費用は150円、利益は120円です。

販売方法

販売には2つの方法があります。

1. 一つ目の販売方法は「自分で価格をつけ、その価格で買う買手が現れるのを待つ」方法です。具体的には、自分が売りたい価格を の「提示する売り注文価格」に入力して「価格提示」のボタンを押します。すると、あなたが提示した価格は の「いま出ている売り注文価格」に表示されます。（あなたを含めたすべての売り手の に価格が表示されます。）買手の誰かがあなたの提示価格に満足して購入すれば（買う約束をすれば）、あなたは商品を1つ売ったことになります。あなたは自由に価格を提示できますが、既に別の売手が販売価格を提示しているときには、あなたはその価格より高い価格をつけられません。 の欄をよく見て現在の最低価格（前ページの図では180円）を超えない価格（上図では160円）を入力してください。

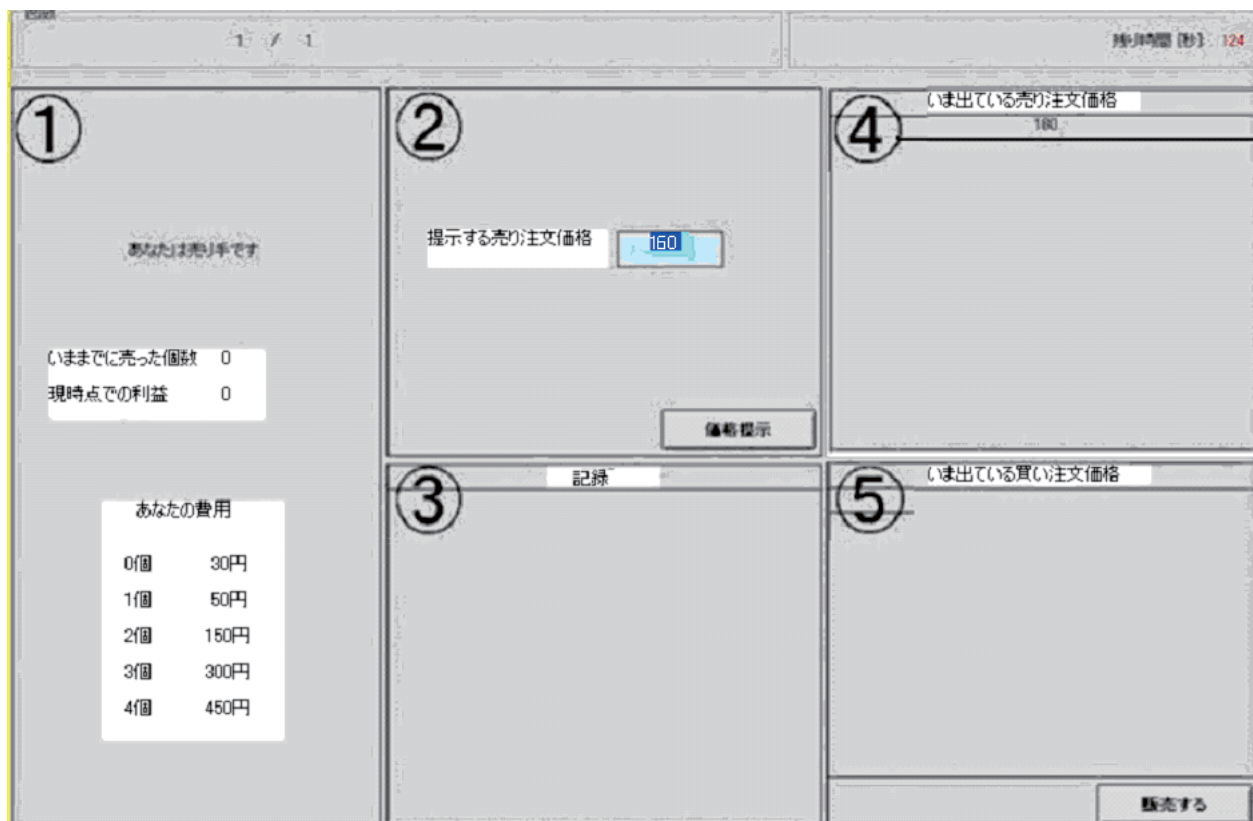


図 4.1: 売り手ゲーム画面

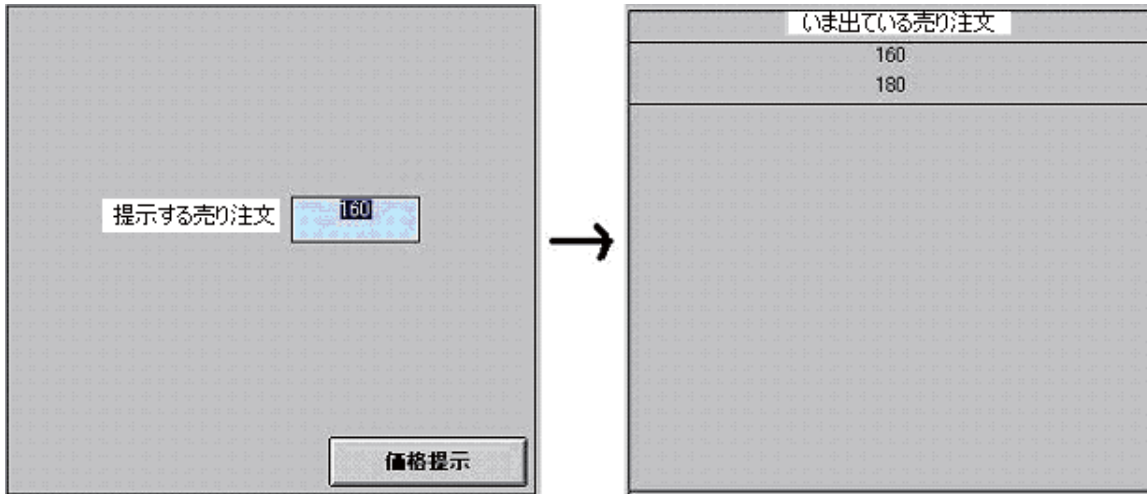


図 4.2: 売り手価格提示画面：提示したい価格を入力して「価格提示」ボタンを押すとその価格が参加者全員に公開される

- 二つ目の方法は「買手がつけた買値を見て、満足の行く価格ならその価格で売る」方法です。買手の買い注文価格は の欄に示されています。あなたがこの欄の価格で売ってもよいと思えば、「販売する」ボタンをしてください。あなたは商品を一つ売れます。（自動的に一番高い価格に選択されます。）

結果の表示

取引が成立すると 1) の場合は全ての買手の の「いま出ている売り注文価格」の欄から売手が提示した価格が消え、2) の場合は全ての売り手の の「いま出ている買い注文価格」の欄から買手が提示した価格が消えます。そして、いずれの場合でも取引価格が全員の に表示されます。

ゲームの終了

ひとつのセッションは () 分間で終わります。残り時間は右上に表示されています。商品は4つとも売る必要はありません。損をすれば売らなくても構いません。もちろんたとえ時間が残っていても、あなたが1回に作れる商品（例では4個）をすべて売ってしまえば、あなたはもう何もできません。終了まで静かに待ってください。



図 4.3: 売り注文画面

あなたが買手になれば…

以下の画面が示されます。ただし ～ の数字は説明のためのもので、実際には表示されません。一番左の には、あなたが買手であること、あなたの買う個数とあなたの余剰が示されています。図の例では、あなたは商品1つの価値は300円、2つの価値は500円、3つの価値は650円、4つの価値は700円と評価しています（5つ以上あっても価値は4つのときより大きくなりません）。もしあなたが商品を200円、100円、150円で買えば、あなたは合計で450円の費用をかけて650円の価値のあるものを得るので、あなたの利益は200円と計算されます。この主観的価値に基づく利益の計算が分かりにくければ、「1つなら400円で、2つなら500円で、3つなら650円で、4つなら700円で買う」という注文を受けているとってください。

購入方法

購入には2つの方法があります。

1. 一つ目の購入方法は「自分で価格をつけ、その価格で売る買手が現れるのを待つ」方法です。具体的には、自分が売りたい価格を の「提示する買い注文価格」に入力して「価格提示」のボタンを押します。すると、あなたが提示した価格は の「いま出ている買い注文価格」に表示されます。（あなたを含めたすべての買手の価格が表示されます。）売手の誰かがあなたの提示価格に満足して販売すれば（売る約束をすれば）、あなたは商品を1つ買ったこととなります。あなたは自由に価格を提示できますが、既

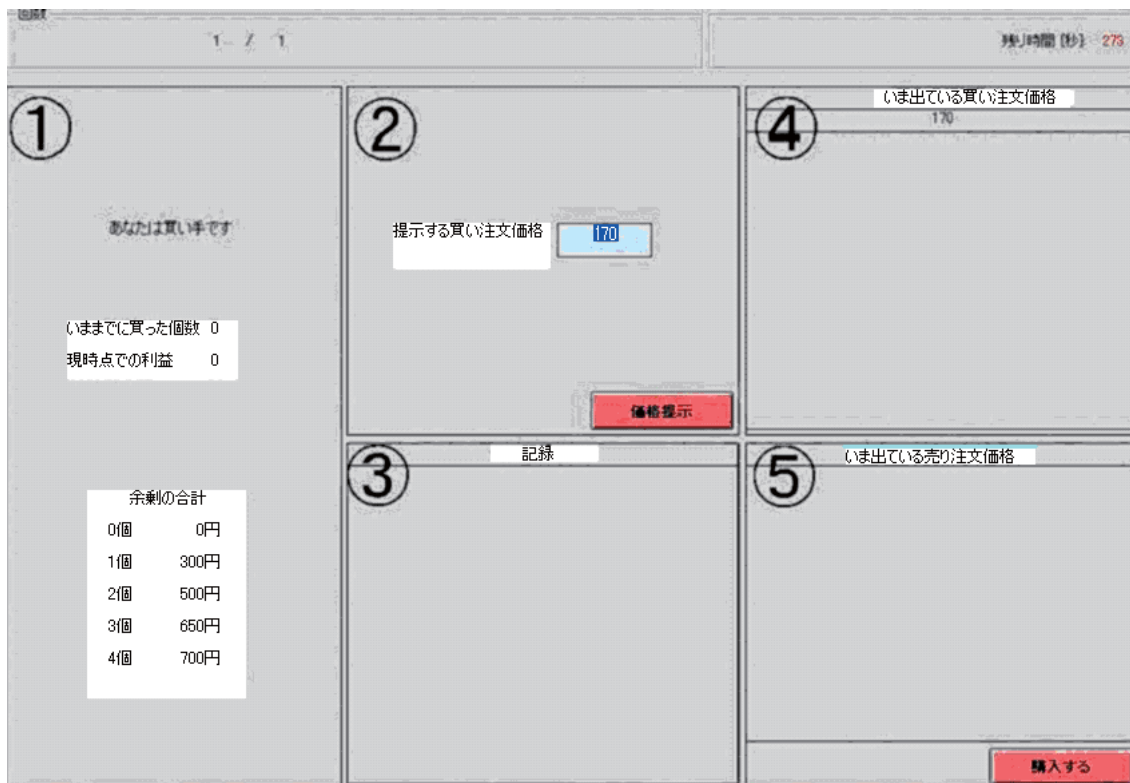


図 4.4: 買い手ゲーム画面

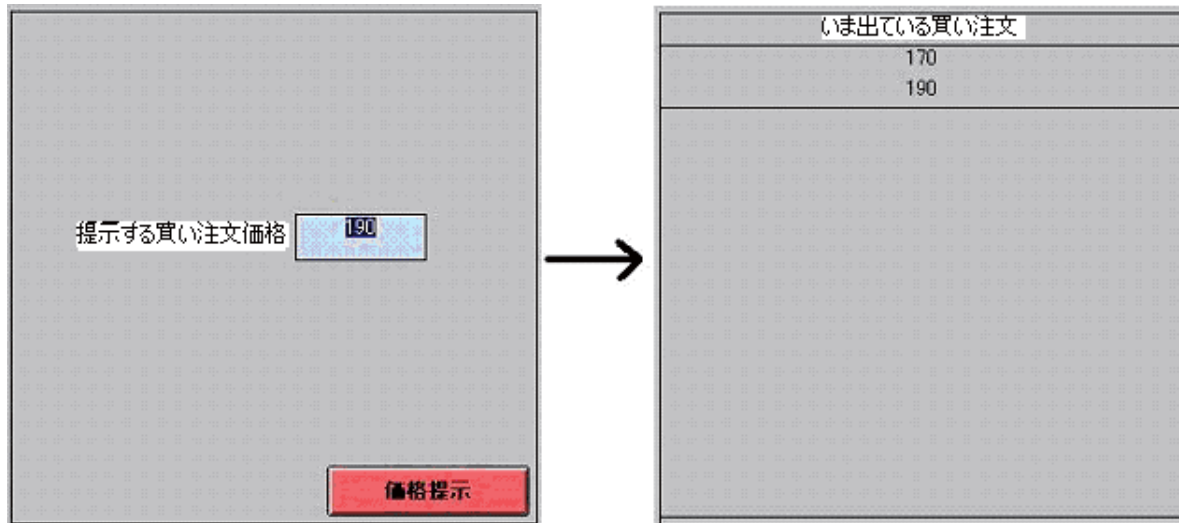


図 4.5: 買い手価格提示画面：提示したい価格を入力して「価格提示」ボタンを押すとその価格が参加者全員に公開される

に別の買手が購入価格を提示しているときには、あなたはその価格より安い価格をつけられません。 の欄をよく見て現在の最低価格（前頁の図では170円）を下回らない価格（上図では190円）を入力してください。

- 二つ目の方法は「売手がつけた買値を見て、満足の行く価格ならその価格で買う」方法です。売手の売り注文価格は の欄に示されています。あなたがこの欄の価格で買ってもよいと思えば、「購入する」ボタンをしてください。あなたは商品の一つ買えます。（自動的に一番安い価格に選択されます。）

結果の表示

取引が成立すると1) の場合は全ての売手の 「いま出ている買い注文価格」の欄から買手が提示した価格が消え、2) の場合は全ての買手の 「いま出ている売り注文価格」の欄から売手が提示した価格が消えます。そして、いずれの場合でも取引価格が全員の に表示されます。



図 4.6: 買い注文画面

ゲームの終了

ひとつの実験は () 分間で終わります。残り時間は右上に表示されています。商品はすべて買う必要はありません。損をすると思えば買わなくても構いません。赤字が出ないように取引して下さい。もちろんたとえ時間が残っていても、あなたが1回に買える商品(例では4個)をすべて買ってしまえば、あなたはもう何もできません。終了まで静かに待ってください。

4.2 ダブルオークション実験 試験と資料

表 4.1: 売手の総費用と買手の総余剰 (各グループに共通の設定です)

売手の費用		買手の余剰	
0個	50円	0個	0円
1個	100円	1個	430円
2個	250円	2個	780円
3個	450円	3個	1030円
4個	750円	4個	1180円

表 4.2: グループ2取引結果集計

	1回目	2回目
最大取引価格	800	300
上25%取引価格	200	200
平均取引価格	182	173
下25%取引価格	140	120
最低取引価格	90	100

問1 表1は売手と買手の財に対する限界費用と限界効用を表している。いま取引価格が220円とするならば、財は売手と買手あわせて合計 _____ 個取引される。価格が _____ 円未満になると売手の取引量は2個、買手の取引量は3個となる。

問1 表4.1から表4.3のいずれかを用いて売手の個別供給曲線と買手の個別需要曲線を描いて下さい。

問2 問1で作成したグラフを用いて、市場需要曲線と供給曲線を描いてください。ただし参加者は売り手23人買い手24人とします。

問3 すべての取引が均衡価格で行われるとすれば、各売り手の利益、各売り手の余剰はそれぞれいくらになりますか？

表 4.3: グループ 2 取引結果 (価格は取引の成立順に並んでいます。)

	1 回目	2 回目		1 回目	2 回目
1	150	100	26	200	120
2	180	100	27	150	100
3	160	150	28	140	210
4	200	140	29	150	200
5	200	100	30	220	180
6	150	160	31	70	100
7	180	90	32	200	180
8	200	200	33	220	200
9	140	120	34	200	200
10	70	180	35	190	120
11	90	200	36	150	180
12	180	200	37	180	180
13	90	180	38	60	220
14	250	70	39	800	200
15	200	200	40	220	240
16	90	200	41	100	200
17	100	150	42	140	150
18	90	130	43	250	250
19	150	140	44	150	120
20	200	100	45	250	250
21	200	180	46	200	250
22	200	120	47	210	250
23	150	260	48	300	280
24	150	300	49	220	
25	210	170			

4.3 解説

各人は各市場で最大4個まで取引できるという設定で、ほぼ同じ学生たちに実験を行った。ただし、全員参加のピット・マーケットでは取引個数が増えすぎるので、京都産業大学の経済実験室（KEEL）の情報環境を利用して、少人数ごとにダブル・オークションとして実施した。実験室の収容人数は最大28人である為、学生を5つのグループに分けて実施した。

第5章 複占市場実験1

5.1 複占市場実験1 インストラクション

手元に説明書（この用紙）、利得表、記録用紙、A社は青の記録用紙、B社はピンクの提出用紙が4枚あることを確認して下さい。（何かひとつでも不足するものがあれば、手を上げて知らせて下さい。）利得表、記録用紙、提出用紙にすべて学籍番号と名前をはっきり書いてください。記録用紙に書かれてる番号があなたのプレイヤー番号です。

実験の説明

ある市場にはA社とB社だけ存在するとします。A社とB社はある商品を生産し販売して利益を得ます。A社またはB社は、どのような意思決定をすることで利益をあげることができるでしょうか？

実験はすべて二人一組のグループで行われます。別途配布した利得表に従い、あなたが選択した数字とランダムに割り当てられた実験相手の選択した数字の組み合わせによってあなたと実験相手の得点（利益）が決定します。全ての取引の合計利得をできるだけ大きくすることを目指してください。

利得表の読み方

- あなたは利得表の縦の列から1～14の価格のうち、いずれかの価格を選択することができます。
- 横の列はあなたの対戦相手の価格を表します。
- 各ボックスの上段青色があなたの得点、下段赤色が実験相手の得点です。
- 各ボックスの数値はあなたが選んだ価格と、実験相手の選んだ価格をマッチさせたときの、あなたと相手の得点を示しています。

- (練習) 配布した利得表の場合、あなたの価格が2 (縦の数字)、あいての価格が1 (横の数字) のとき、あなたの得点はいくらですか？また相手の得点はいくらですか？

実験の中のあなたの行動

1. 配られた全ての提出用紙を真ん中で二つに切ってください。左下にプレイヤー番号、および学籍番号、名前を書いて下さい。
2. 利得表を良く見て取引価格 (1~14) を決めて下さい。
3. 価格を決めたら、提出用紙に価格を大きく、はっきり読みやすい字で書いて下さい。
4. 提出用紙を提出します。提出したら対戦相手の決定についてアナウンスがあるまで記録用紙をまとめて下さい。
5. 記録用紙にもあなたの決めた価格を記入して下さい。また対戦相手の予想価格書いて下さい。
6. 記録用紙に、あなたが価格を決めた理由と実験相手の予想提示価格の理由を明確に書いて下さい。
7. 黒板にA社とB社の対戦結果が張り出されます。(対戦相手は毎回ランダムに決定されます。)
8. 自分のプレイヤー番号からそのセッションの実験相手の価格を確認し、自分の得点と相手の得点を記録用紙に記入して下さい。

記録用紙の書き方

1. 記録用紙を真ん中で2枚に切り分けてください。
2. A社 (青色の記録用紙) の人は、紙の下部にプレイヤー番号と名前を読みやすい字で書いて下さい。
3. B者 (ピンク色の記録用紙) の人は、すでにプレイヤー番号は記入されているので、紙の下部に名前のみを読みやすい字で書いて下さい。



図 5.1: 記録用紙

5.2 解説

教室実験を開始する前に、本実験は学生をランダムにグループ A とグループ B のペアに分けた。¹そして教室に2つのグループを別々に座らせた。実験の途中で実験に参加する学生が個人を特定することはできない。学生は共通のインストラクションと利得表とグループに対応した記録用紙が配られた。両グループの参加者が同数となったところで説明を開始した。

5.3 利得表

¹友達同士で実験に参加するときはなるべくグループを分けたり、座席を離し、実験中に相談を取れない措置を行った。

表 5.1: ベルトランモデル利得表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	312 312	332 338	352 342	372 326	382 309	392 288	412 230	432 150	452 50	472 -72	492 -215	512 -378	532 -563	552 -768
2	338 332	363 363	388 372	413 361	425 347	438 328	463 275	488 200	513 105	538 -12	563 -150	588 -308	613 -488	638 -688
3	342 352	372 388	402 402	432 396	447 384	462 368	492 320	522 250	552 160	582 48	612 -85	642 -238	672 -413	702 -608
4	326 372	361 413	396 432	431 431	448 422	466 408	501 365	536 300	571 215	606 108	641 -20	676 -168	711 -338	746 -528
5	309 382	347 425	384 447	422 448	441 441	459 428	497 387	534 325	572 242	609 138	647 13	684 -133	722 -300	759 -488
6	288 392	328 438	368 462	408 466	428 459	448 448	488 410	528 350	568 270	608 168	648 46	688 -98	728 -263	768 -448
7	230 412	275 463	320 492	365 501	387 497	410 488	455 455	500 400	545 325	590 228	635 111	680 -28	725 -188	770 -368
8	150 432	200 488	250 522	300 536	325 534	350 528	400 500	450 450	500 380	550 288	600 176	650 42	700 -113	750 -288
9	50 452	105 513	160 552	215 571	242 572	270 568	325 545	380 500	435 435	490 348	545 241	600 112	655 -38	710 -208
10	-72 472	-12 538	48 582	108 606	138 609	168 608	228 590	288 550	348 490	408 408	468 306	528 182	588 38	648 -128
11	-215 492	-150 563	-85 612	-20 641	13 647	46 648	111 635	176 600	241 545	306 468	371 371	436 252	501 113	566 -48
12	-378 512	-308 588	-238 642	-168 676	-133 684	-98 688	-28 680	42 650	112 600	182 528	252 436	322 322	392 188	462 32
13	-563 532	-488 613	-413 672	-338 711	-300 722	-263 728	-188 725	-113 700	-38 655	38 588	113 501	188 392	263 263	338 112
14	-768 552	-688 638	-608 702	-528 746	-488 759	-448 768	-368 770	-288 750	-208 710	-128 648	-48 566	32 462	112 338	192 192

第6章 複占市場実験2

6.1 複占市場実験2インストラクション

手元に説明書（この用紙）、利得表、記録用紙、A社は提出用紙が5枚あることを確認して下さい。（何かひとつでも不足するものがあれば、手を上げて知らせて下さい。）

記録用紙に書かれてる番号があなたのプレイヤー番号です。

実験の説明

ある市場にはA社とB社だけ存在するとします。A社とB社はある商品を生産し販売して利益を得ます。A社が先に販売価格の情報を公開します。B社はA社の販売価格を見てから、自分の販売価格を決定します。A社またはB社は、どのような意思決定をすることで、なるべく大きな利益をあげることができるでしょうか？

実験はすべてランダムに決められた二人一組のグループで行われます。別途配布した利得表に従い、あなたが選択した数字と実験相手の選択した数字の組み合わせによってあなたと実験相手の得点（利益）が決定します。全ての取引の合計利得をできるだけ大きくすることを目指して下さい。

実験2の流れ

実験2は先手プレイヤー（A社）と後手プレイヤー（B社）に分かれて実験を行います。

1. 提出用紙と利得表にプレイヤー番号と名前を記入する。（プレイヤー番号は記録用紙に書いてあります。）
2. 先手プレイヤーはなるべく自分の利得が大きくなる価格を選んで提出する。
3. 先手プレイヤーの提出用紙を実験者が回収し、ランダムに後手に配る。
4. 後手プレイヤーは自分に配られた先手プレイヤーの価格を見て、利得を最大化できる価格を選んで提出する



図 6.1: 提出用紙の書き方

5. 先手・後手のプレイヤーの組み合わせ対戦結果が黒板に表示される。
6. 各人の自分の利得を確認し記入する。

全員：提出用紙の書き方

1. 今回は一枚の提出用紙の A 社は紙の左側に、B 社は紙の右側に価格を記入します。
2. A 社の方は紙の下部に自分のプレイヤー番号を書いて下さい。(名前は個人が特定できるので書かないで下さい。)
3. B 社の方は自分のプレイヤー番号と名前を書いて下さい。
4. 図 1 を参考にして A 社の方は黒板に掲示されたときに自分の提出用紙が分かるようにプレイヤー番号を大きめに、B 社の方は A 社に価格がわかるように価格を大きめに書いてください。

実験中の行動

A 社：先手プレイヤーの行動

先手プレイヤーは先に価格を決定して提出します。以下が実験中の行動になります。

1. 利得表からひとつ販売価格を決めて下さい。
2. 価格を決めたら提出用紙に価格を大きく、はっきり読みやすい字で書いて下さい。
3. 記録用紙にあなたの決めた価格を記入して下さい。また B 社の提示販売価格の予想を書いて下さい。
4. 記録用紙に、あなたが価格を決めた理由と B 社の予想提示価格の理由を明確に書いて下さい。
5. 提出用紙を提出します。提出したら対戦相手の決定についてアナウンスがあるまで記録用紙をまとめて下さい。

B社：後手プレイヤーの行動

後手プレイヤーは先手プレイヤーが価格を提出し価格が黒板に掲示されてから自分の価格を決定します。

1. 先手プレイヤーの価格が発表されるまでの間、利得表からあなたの販売価格と A 社の販売価格予想を記録用紙に記入して下さい。
2. 記録用紙に、あなたが販売価格を決めた理由と A 社の提示価格予想の理由を明確に書いて下さい。
3. 実験者から A 社の販売価格の書かれた提出用紙が配布されます。
4. A 社の提示価格を見て、あなたの販売価格を決めたら提出用紙に価格を大きくはっきり読みやすい字で書いて下さい。
5. 提出用紙を提出します。提出したら全ての対戦相手結果のアナウンスがあるまで、記録用紙にあなたがその価格を選んだ理由を書いて下さい。

全員：先手・後手の結果が張り出された後の行動

1. 黒板に掲示されている自分の提出用紙を確認して下さい。
2. 自分の得点と相手の価格、得点を記録用紙に書き込んで下さい。
3. 実験結果を見て次回のセッションの相手の予想提示価格を考え、その理由とそれに対するあなたの選択価格と選んだ理由を記入して下さい。

6.2 解説

ゲーム理論はベルトラン-シュタッケルベルグ複占ゲームをプレイヤーAとプレイヤーBが他のプレイヤーの戦略や行動を知ることなしに、自分自身の戦略を交互に決定するものと定義している。このゲームでは複占市場実験1の場合との違いは先手プレイヤーが意思決定を行ってから後手プレイヤーが意思決定を行うところに最大の違いがある。

第7章 複占市場実験3

7.1 複占市場実験3 インストラクション

手元に説明書（この用紙）、利得表、記録用紙があるか確認してください。（何かひとつでも不足するものがあれば、手を上げて知らせて下さい。）

記録用紙に書かれてる番号があなたのプレイヤー番号です。A社の人には自分の組番だけを提出用紙に記入して下さい。例えばA-26番のプレイヤー番号の人は26が組番です。今回の実験では、提出用紙に名前、学籍番号などの個人が特定できる情報は記入しないで下さい。

実験の説明

ある市場にはA社とB社だけ存在するとします。A社とB社はある商品を生産し販売して利益を得ます。今回の実験では、お互いに誰と実験しているか分かりませんが、全てのセッションを同じ相手と対戦します。

別途配布した利得表に従い、あなたが選択した数字（生産数）と実験相手の選択した数字（生産数）の組み合わせによってあなたと実験相手の得点（利益）が決定します。全ての取引の合計利得をできるだけ大きくすることを目指して下さい。A社またはB社は、どのような意思決定をすることで、なるべく大きな利益をあげることができるでしょうか？

実験3の流れ

実験3は先手プレイヤー（A社）と後手プレイヤー（B社）に分かれて実験を行います。

1. A社の人には提出用紙の上部に組番を書いて下さい。（図1を参照して下さい。）
2. 記録用紙と利得表にプレイヤー番号と名前を記入する。（プレイヤー番号は記録用紙に書いてあります。）
3. 先手プレイヤーが生産数を選んで提出する。
4. 先手プレイヤーの決定した生産数が後手プレイヤーに伝えられる。

5. 後手プレイヤーは先手プレイヤーの生産数を見て自分の生産数を選んで提出する。
6. 先手・後手のプレイヤーの対戦結果が黒板に表示される。
7. 各人の自分の利得を確認し記入する。

実験中の行動

A社：先手プレイヤーの行動

先手プレイヤーは先に生産数を決定して提出します。以下が実験中の行動になります。

1. 利得表からひとつ生産数を決めて下さい。
2. 生産数を決めたら提出用紙に数字を大きく、はっきり読みやすい字で書いて下さい。
3. 記録用紙にあなたの決めた生産数を記入して下さい。またB社の提示生産数の予想を書いて下さい。
4. 記録用紙に、あなたが生産数を決めた理由とB社の予想提示生産数の理由を明確に書いて下さい。
5. 提出用紙を提出します。実験結果の掲示があるまでが記録用紙をまとめて下さい。

B社：後手プレイヤーの行動

後手プレイヤーは先手プレイヤーが決めた生産数が記入された提出用紙を受け取ります。記入されている先手プレイヤーの生産数を考慮し利得表から自分の生産数を決定します。

1. 先手プレイヤーからの生産数の記入された提出用紙が配布される前に、利得表からあなたの生産数とA社の生産数予想を記録用紙に記入して下さい。
2. 記録用紙に、あなたが生産数を決めた理由とA社の提示生産数予想の理由を明確に書いて下さい。
3. 提出用紙が配布されたら先手プレイヤーの生産数を見て、あなたの生産数を決めます。提出用紙に生産数を大きく、はっきり読みやすい字で書いて下さい。
4. 提出用紙を提出します。提出したら全ての対戦結果のアナウンスがあるまで、記録用紙にあなたがその生産数を選んだ理由を書いて下さい。



図 7.1: 流れ図

全員：先手・後手の結果が張り出された後の行動

1. 黒板に掲示されている自分の提出用紙を確認して下さい。
2. 先手プレイヤーはと後手プレイヤーの生産数を記録用紙に書き込んで下さい。
3. 実験結果を見て次回のセッションの相手の予想提示生産数を考え、その理由とそれに対するあなたの選択生産数と選んだ理由を記入して下さい。

7.2 解説

7.3 クールノーモデル利得表

実験3では、実験2比べると先手プレイヤーが後手プレイヤーより有利である。しかし先手プレイヤーの提示する生産数に対して、後手プレイヤーは反発することで自分の利得を最大化する生産数を先手プレイヤーに選ばせることができる。

3aの先手プレイヤーはセッション1では、後手プレイヤーの反応を知ることはできないので、各プレイヤーごとに個人的な目的で選択数を決定する。しかしセッションを重ねる毎に後手プレイヤーが反発しないことが分かってくると、最終的に先手プレイヤーが利得が最大化できるSPNEを選択することができる。

表 7.1: クールノーモデル利得表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	916 916	874 1748	832 2496	790 3160	748 3740	706 4236	664 4648	622 4976	580 5220	538 5380	496 5456	454 5448	412 5356	370 5180
2	1748 874	1664 1664	1580 2370	1496 2992	1412 3530	1328 3984	1244 4354	1160 4640	1076 4842	992 4960	908 4994	824 4944	740 4810	656 4592
3	2496 832	2370 1580	2244 2244	2118 2824	1992 3320	1866 3732	1740 4060	1614 4304	1488 4464	1362 4540	1236 4532	1110 4440	984 4264	858 4004
4	3160 790	2992 1496	2824 2118	2656 2656	2488 3110	2320 3480	2152 3766	1984 3968	1816 4086	1648 4120	1480 4070	1312 3936	1144 3718	976 3416
5	3740 748	3530 1412	3320 1992	3110 2488	2900 2900	2690 3228	2480 3472	2270 3632	2060 3708	1850 3700	1640 3608	1430 3432	1220 3172	1010 2828
6	4236 706	3984 1328	3732 1866	3480 2320	3228 2690	2976 2976	2724 3178	2472 3296	2220 3330	1968 3280	1716 3146	1464 2928	1212 2626	960 2240
7	4648 664	4354 1244	4060 1740	3766 2152	3472 2480	3178 2724	2884 2884	2590 2960	2296 2952	2002 2860	1708 2684	1414 2424	1120 2080	826 1652
8	4976 622	4640 1160	4304 1614	3968 1984	3632 2270	3296 2472	2960 2590	2624 2624	2288 2574	1952 2440	1616 2222	1280 1920	944 1534	608 1064
9	5220 580	4842 1076	4464 1488	4086 1816	3708 2060	3330 2220	2952 2296	2574 2288	2196 2196	1818 2020	1440 1760	1062 1416	684 988	306 476
10	5380 538	4960 992	4540 1362	4120 1648	3700 1850	3280 1968	2860 2002	2440 1952	2020 1818	1600 1600	1180 1298	760 912	340 442	-80 -112
11	5456 496	4994 908	4532 1236	4070 1480	3608 1640	3146 1716	2684 1708	2222 1616	1760 1440	1298 1180	836 836	374 408	-88 -104	-550 -700
12	5448 454	4944 824	4440 1110	3936 1312	3432 1430	2928 1464	2424 1414	1920 1280	1416 1062	912 760	408 374	-96 -96	-600 -650	-1104 -1288
13	5356 412	4810 740	4264 984	3718 1144	3172 1220	2626 1212	2080 1120	1534 944	988 684	442 340	-104 -88	-650 -600	-1196 -1196	-1742 -1876
14	5180 370	4592 656	4004 858	3416 976	2828 1010	2240 960	1652 826	1064 608	476 306	-112 -80	-700 -550	-1288 -1104	-1876 -1742	-2464 -2464

第8章 複占市場実験4

8.1 複占市場実験4インストラクション

手元に説明書（この用紙）、利得表、記録用紙があることを確認して下さい。（何かひとつでも不足するものがあれば、手を上げて知らせて下さい。）利得表、記録用紙に学籍番号と名前をはっきり書いてください。

渡された記録用紙の番号があなたのプレイヤー番号（組番）です。

実験の流れ

ある市場にはA社とB社だけ存在するとします。A社とB社はある商品を生産し販売して利益を得ます。

今回の実験は、対戦相手はお互いに誰かはわかりません。実験相手は全てのセッションを通して変わることはありません。

A社またはB社は、どのような意思決定をすることで利益をあげることができるでしょうか？すべての取引の合計利得をできるだけ大きくすることを目指して行動してください。

1. 記録用紙に学籍番号、名前、提出用紙に組番と名前を記入する。
2. A社、B社ともに価格を選んで提出用紙に記入する。
3. A社、B社それぞれのプレイヤーの提出用紙は同時に回収される。
4. A社、B社の各組番の実験結果が黒板に掲示される。

全員：実験を始める前にすること

1. 記録用紙に学籍番号、名前、を書いて下さい。
2. 配られた提出用紙を半分の大きさに切ってください。提出用紙の右上にプレイヤー番号（組番）を左下には名前を記入して下さい。（図1参照）

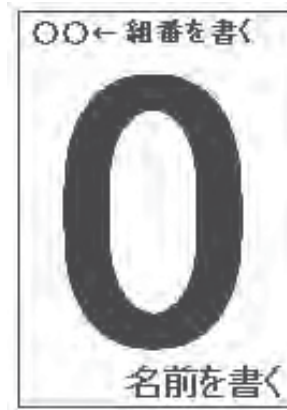


図 8.1: 提出用紙

実験の中の行動

A社の行動

A社は価格を決定して提出します。以下が実験中の行動になります。

1. 利得表から価格を決めてください。記録用紙にあなたの決めた価格を記入して下さい。またB社の予想価格も書いて下さい。
2. 記録用紙に生産数を決めた理由とB社の予想提示価格の理由を明確に書いて下さい。
3. 提出用紙に価格を大きくはっきり読みやすい字で記入して下さい。
4. 提出用紙が回収されます。回収されたら取引結果掲示があるまで記録用紙をまとめて下さい。

B社の行動

今回は、A社が価格を決定すると同時にB社も価格を決定します。

1. 利得表から価格を決めてください。記録用紙にあなたの決めた価格を記入して下さい。またA社の予想価格も書いて下さい。
2. 記録用紙に生産数を決めた理由とA社の予想提示価格の理由を明確に書いて下さい。
3. 提出用紙に価格を大きくはっきり読みやすい字で記入して下さい。

4. 提出用紙が回収されます。回収されたら取引結果掲示があるまで記録用紙をまとめて下さい。

全員：先手・後手の結果が張り出された後の行動

1. 黒板に掲示されている自分の組番の提出用紙を確認してください。
2. 実験結果を記録用紙に書き込んでください。
3. 他の組番の取引結果も参考にしながら、各セッションにおける自分の行動や相手の行動などの分析を行ってください。

8.2 解説

実験4では、表5.1の利得表を用いて実験を行った。ナッシュ均衡は両方のプレイヤーの交点 $(P_A, P_B) = (3, 3)$ である。実験4は実験1と比べて意思決定を同時に行うことは同じであるが、全ての実験セッションにおいて対戦相手は固定で行った。

オープン・リサーチ・センター整備事業

「経済実験による研究と教育：実験から誰が何を学ぶか」

平成21年3月

発行 京都産業大学
〒603-8555 京都市北区上賀茂本山
印刷 株式会社 田中プリント

本報告書に残る誤記の修正（この頁）と追加業績（裏面）

2009年3月31日

「本報告書について」の下から4行目

(誤) このプロジェクトせ → (正) このプロジェクトで

8頁22行目。

(誤) Nick Feltvick → (正) Nick Feltovich

67頁。第2段落に、以下の記述を追加する。

★は、招待論文である。

72頁, A4の経済雑誌名を改める。

(誤) *Mathematical Logic Quality* → (正) *International Journal of Modern Physics C*

72頁, A5の掲載雑誌名として以下を記載する。

Scientometrics

76頁。A39の掲載雑誌名などを追加する。

Scientometrics, vol.68 (no.3), pp.643-655.

89頁。D46の著者を改める。

(誤) 野澤孝之 → (正) 野澤孝之, 近藤敏之

79-81頁に収録する論文にB番号の欠落するものがある。

77-83頁の日本語プロシーディングス収録論文において、記述を以下のように改める。

(誤) in 『会議名』, presented at 『予稿集名』 → (正) in 『予稿集名』, presented at 『会議名』

業績表 (B3.2) に以下の3件を追加する。

Kazuhito Ogawa, Testuya Kawamura, Sobei H. Oda, and Kikutani Tatsuya (24-27 March 2009), “The Experimental Multimarket Contact—As Defined by the Prisoner’s Dilemma and Coordination Games—Does Not Facilitate Cooperation”, presented at *2009 Western Economic Association International Pacific Rim Conference*, Kyoto, Japan

Ryohei Haitani, and Sobei H. Oda (24-27 March 2009), “What Differs between Laboratory and Classroom?”, presented at *2009 Western Economic Association International Pacific Rim Conference*, Kyoto, Japan

Nick Feltovich, Atsushi Iwasaki, and Sobei H. Oda (24-27 March 2009), “Payoff Levels, Equilibrium Selection, and Learning: An Experimental Study of the Stag Hunt”, presented at *2009 Western Economic Association International Pacific Rim Conference*, Kyoto, Japan

以下の論文が、Journal of Education for Business の指示に従って改訂中である。

Does Economics Education Make Bad Citizens?

The Effect of Economics Education in Japan

Yoshio IIDA, Sobei H. Oda

経済学教育を受けることで合理的・利己的な選択をするようになるだろうか。アメリカの研究においていくつか肯定的な結果が出ているが、日本においてもこのような効果があるかを本研究は検証した。囚人のジレンマを用いた被験者実験とアンケートの結果、被験者実験においては経済学部の学生と他学部との間に明確な差は見られなかった。しかし相手の配送ミスによる利益がある場合に正直に相手に知らせるかや、お金を拾った場合に届けるかを尋ねるアンケートにおいては経済学部の学生は有意に利己的な回答をした。

Nominal logistic fit regressions

variable	Experiment	Questionnaire	
	Prisoners dilemma	Error shipping	Lost envelop
constant	1.109 (<.0001)	-1.335 (<.0001)	-1.83 (<.0001)
econ	-0.077 (-0.4887)	-0.457 (0.0004)**	-0.257 (-0.036)*
sex	-0.038 (-0.7373)	-0.099 (-0.493)	-0.492 (-0.001)**
grade	0.196 (-0.0506)	0.099 (-0.831)	0.492 (-0.1)
R square	0.0094	0.0358	0.0459
p-value	0.1847	0.0026	0.0002

Note: Decisions were coded as 1 for cooperation and as 0 for betrayal. Responses of all questions are coded as 1 for “yes” and 0 for “no”. The independent variable “econ” equals 1 if a subject is economics majors and 0 otherwise; “sex” equals 1 if a subject is male and 0 otherwise; “grade” coded as 1 for freshmen, 2 for sophomores, 3 for juniors, 4 for seniors. p-values of coefficients are in parentheses. *,** Indicates significance at 10%, 5%, respectively.

本報告書では、新しい経済学教育の方法の開発とその効果の検証を論じたが、プロジェクトは、同時に経済学教育が学生たちの考え方に与える一般的効果についての研究を継続的に進めた。以上は、それについての業績である。